

**CARLOS HENRIQUE SILVA MOURA**

**Sistema híbrido solar-eólico-biogás incluindo produção, armazenamento e  
uso dinâmico de hidrogênio**

**Carlos Henrique Silva Moura**

**Sistema híbrido solar-eólico-biogás incluindo produção, armazenamento e uso dinâmico de hidrogênio**

Dissertação apresentada ao Conselho do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Energia.

Orientador: José Luz Silveira

Coorientador: Wendell de Queiróz Lamas

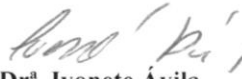
M929s	<p>Moura, Carlos Henrique Silva</p> <p>Sistema híbrido solar-eólico-biogás incluindo produção, armazenamento e uso dinâmico de hidrogênio / Carlos Henrique Silva Moura – Guaratinguetá, 2020.</p> <p>83 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 77</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2020.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira</p> <p>Coorientador: Prof. Dr. Wendell de Queiróz Lamas</p> <p>1. Energia solar. 2. Energia eólica. 3. Hidrogênio como combustível.</p> <p>I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 620.91(043)</p>
-------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**CARLOS HENRIQUE SILVA MOURA**

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA: ENERGIA**

**APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**

  
**Prof.ª. Dr.ª. Ivonete Ávila**  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA:**



**Prof. Dr. JOSÉ LUZ SILVEIRA**  
Orientador / UNESP-FEG



**Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA**  
UNESP-FEG



**Prof. Dr. JOSÉ RUI CAMARGO**  
UNITAU

## **DADOS CURRICULARES**

### **CARLOS HENRIQUE SILVA MOURA**

<b>NASCIMENTO</b>	14/09/1990 – Taubaté / SP
<b>FILIAÇÃO</b>	Valter Nogueira de Moura Maria Auxiliadora da Silva Moura
<b>2019-03/2019-10</b>	Curso de Especialização em Formação em Educação a Distância Universidade Paulista
<b>2018-08/2019-08</b>	Curso de Graduação em Matemática Universidade de Franca
<b>2011/2015</b>	Curso de Graduação em Engenharia Civil Universidade de Taubaté
<b>2007-06/2008</b>	Curso Técnico em Informática Escola Técnica Estadual “Dr. Geraldo José Rodrigues Alckmin”

Dedico este trabalho à milha família, de modo especial aos meus pais, Valter e Maria Auxiliadora.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço a minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos,

ao meu orientador e coorientador, *Prof. Dr. José Luz Silveira* e *Prof. Dr. Wendell de Queiróz Lamas*, respectivamente, que jamais deixaram de me incentivar. Sem a orientação, dedicação e o auxílio deles, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível,

ao *Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna* que sempre esteve presente auxiliando e cooperando com meu desenvolvimento acadêmico,

aos meus pais *Valter* e *Maria Auxiliadora*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos,

aos meus amigos e parceiros desta jornada na vida acadêmica, em especial, *a Luciana, Mariana, Regina, ao Leonardo, Victor, João Paulo, Omar, Rodrigo, Raul, Cristhian e Lucas*, os quais não apenas me apoiaram e ajudaram, como também suavizaram todo o percurso,

ao Instituto de Pesquisa em Bioenergia (IPBEN- UNESP) - Laboratório Associado de Guaratinguetá e Laboratório de Otimização de Sistemas Energéticos (LOSE - FEG - UNESP) por todo suporte fornecido,

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Louvado seja o nome de Deus para todo o sempre; a sabedoria e o poder a ele pertencem.

Ele muda as épocas e as estações; destrona reis e os estabelece. Dá sabedoria aos sábios e conhecimento aos que sabem discernir.

Revela coisas profundas e ocultas; conhece o que jaz nas trevas, e a luz habita com ele.

Eu te agradeço e te louvo, ó Deus dos meus antepassados; tu me deste sabedoria e poder, e me revelaste o que te pedimos; revelaste-nos o sonho do rei.”

Daniel 2:20-23

## RESUMO

A inserção de fontes alternativas e confiáveis de energia na sociedade brasileira vem ganhando destaque e crescente importância, contudo, ainda é um grande desafio, visto que a sociedade ainda é majoritariamente dependente de combustíveis fósseis. Os impactos ambientais causados por eles são prejudiciais à vida humana e ao meio ambiente, além de confirmar a urgência da aplicação de tais tecnologias em diferentes cenários da sociedade. O hidrogênio, como vetor energético, vem ganhando destaque e aplicações dentro dos mais variados setores da sociedade, principalmente no setor de transporte como combustível. Dado ao exposto, esse trabalho tem como objetivo analisar a produção de hidrogênio renovável para uso como combustível veicular. A metodologia para a análise técnica consistiu em obter o consumo de energia elétrica para produção do hidrogênio, para assim com base nos recursos solares, eólicos e de biogás de São Paulo (SP), realizar o balanço energético e desta forma dimensionar o sistema híbrido. Baseado nos resultados técnicos, a metodologia econômica permitiu analisar a viabilidade financeira de implementar o sistema híbrido dimensionado permitindo determinar o nível de investimento, o custo da energia elétrica gerada, o custo do hidrogênio gerado e o período de retorno do investimento. A análise ambiental fundamentou-se em determinar a eficiência ecológica considerando os sistemas geradores de eletricidade para o processo de eletrólise da água. Os resultados obtidos mostram que o sistema híbrido proposto pode ser capaz de fornecer a eletricidade demandada para o processo de eletrólise da água, para produção de hidrogênio e sua compressão. A viabilidade econômica e bom desempenho ecológico são comprovados. Conclui-se que a aplicação de energias renováveis para produção de hidrogênio e eletricidade são viáveis sobre o ponto de vista técnico, econômico e ambiental.

**PALAVRAS-CHAVE:** Hidrogênio renovável. Energia solar. Energia eólica. Bioenergia. Sistema híbrido.

## **ABSTRACT**

The insertion of alternative and reliable sources of energy in Brazilian society has been gaining prominence and growing importance, however, it is still a great challenge, since society is still mostly dependent on fossil fuels. The environmental impacts caused by them are harmful to human life and the environment, in addition to confirming the urgency of the application of such technologies in different scenarios of society. Hydrogen, as an energy vector, has been gaining prominence and applications within the most varied sectors of society, mainly in the transport sector as a fuel. Given the above, this work aims to analyze the production of renewable hydrogen for use as a vehicle fuel. The methodology for the technical analysis consisted of obtaining the consumption of electric energy for the production of hydrogen, so that, based on the solar, wind and biogas resources of São Paulo (SP), carry out the energy balance and thus dimension the hybrid system. Based on the technical results, the economic methodology made it possible to analyze the financial feasibility of implementing the scaled hybrid system allowing to determine the level of investment, the cost of the electricity generated, the cost of the hydrogen generated and the period of return on investment. The environmental analysis was based on determining the ecological efficiency considering the electricity generating systems for the water electrolysis process. The results obtained show that the proposed hybrid system may be able to supply the electricity required for the water electrolysis process, for the production of hydrogen and its compression. Economic viability and good ecological performance are proven. It is concluded that the application of renewable energies for the production of hydrogen and electricity are feasible from a technical, economic and environmental point of view.

**KEYWORDS:** Renewable hydrogen. Solar energy. Wind energy. Bioenergy. Hybrid system.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Capacidade solar fotovoltaica e adições anuais, 2006-2016.....	23
Figura 2 - Efeito da luz em uma célula fotovoltaica de silício .....	24
Figura 3 - Conexão de uma célula fotovoltaica a um circuito de carga externo .....	24
Figura 4 - Célula solar fotovoltaica, módulo e arranjo.....	26
Figura 5 - Condição de sombreamento parcial.....	27
Figura 6 - I-V curva sob condição de sombreamento parcial .....	28
Figura 7 - Capacidade de energia eólica e adições anuais, 2006-2016 .....	29
Figura 8 - Participação de Energia Renovável Estimada da Produção Global de Eletricidade, Final de 2016 .....	29
Figura 9 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte no Brasil .....	30
Figura 10 - Componentes de uma turbina eólica de eixo horizontal .....	31
Figura 11 - Esquema de uma turbina eólica de eixo horizontal .....	32
Figura 12 - Esquema da turbina do eixo vertical do tipo Darrieus.....	32
Figura 13 - Esquema da turbina do eixo vertical do tipo Savonius.....	33
Figura 14 - Geração Global de Bioenergia, por Região, 2006-2016 em Terawatt-horas por ano .....	35
Figura 15 - Estrutura dos modelos mais usuais de digestores: (a) indiano, (b) chinês e (c) batelada.....	37
Figura 16 - Diagrama esquemático de uma sociedade de economia de hidrogênio, baseado em recursos de energia renovável para produção e armazenamento de hidrogênio.....	39
Figura 17 - Diagrama esquemático de um eletrolisador alcalino .....	41
Figura 18 - Diagrama esquemático de um sistema energético híbrido eólico-solar-híbrido....	42
Figura 19 - Tipos de tanques para armazenamento de hidrogênio gasoso comprimido.....	44
Figura 20 - Estágios do hidrogênio: (a) produção, (b) armazenamento, (c) abastecimento e (d) consumo.....	45
Figura 21 - Esquema simplificado do sistema híbrido de geração .....	46
Figura 22 - Mapa do traçado do Corredor Metropolitano ABD (São Mateus - Jabaquara) ....	48
Figura 23 - Irradiação Solar na cidade de São Paulo.....	50
Figura 24 - Velocidade média dos ventos por períodos, em meses, da cidade de São Paulo para uma altura 50 m .....	52
Figura 25 - Densidade de probabilidade de Rayleigh para cidade de São Paulo .....	54

Figura 26 - Eletricidade gerada pelos painéis solares fotovoltaicos ( $E_{GSF}$ ), pelos aerogeradores ( $E_{GE}$ ) e pelo conjunto motor de combustão interna-gerador ( $E_{GMCI}$ ) .....	60
Figura 27 - Eletricidade gerada pela planta híbrida ( $E_{GSH}$ ) vs. eletricidade requerida ( $E_{Req}$ ) ..	60
Figura 28 - Hidrogênio produzido, consumido e armazenado ao longo de 365 dias .....	63
Figura 29 - Hidrogênio produzido, consumido e armazenado ao longo dos primeiros 31 dias, correspondentes ao mês de janeiro .....	64
Figura 30 - Custo da eletricidade produzida pela planta híbrida vs. <i>payback</i> .....	71
Figura 31 - <i>Payback</i> do investimento para produção eletricidade.....	71
Figura 32 - Custo do hidrogênio produzido pela planta híbrida vs. <i>payback</i> .....	72
Figura 33 - <i>Payback</i> do investimento para produção hidrogênio .....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Células solares fotovoltaicas categorizadas por suas tecnologias, eficiências de conversão e vida útil .....	25
Tabela 2 - Dados do eletrolisador HySTAT®-100-10 da Hydrogenics .....	48
Tabela 3 - Especificações do módulo Canadian Solar CS6X-315 .....	57
Tabela 4 - Especificações da turbina eólica Aeolos 5 kW .....	57
Tabela 5 - Especificações do motor de combustão interna a biogás ER-BR OC13 6C/24V ...	57
Tabela 6 - Especificações do compressor de hidrogênio C06-40-300/600LX .....	58
Tabela 7 - Número de equipamentos que compõe o sistema híbrido .....	58
Tabela 8 - Balanço energético do sistema híbrido solar-eólico-biogás .....	59
Tabela 9 - Resultados energéticos dos processos envolvidos na eletrólise da água.....	61
Tabela 10 - Resultados energéticos do processo de compressão do hidrogênio .....	61
Tabela 11 - Investimento realizado para o funcionamento da planta híbrida.....	70
Tabela 12 - Investimento realizado nos tanques para armazenamento de hidrogênio .....	70
Tabela 13 - PAG médio para a produção de hidrogênio eletrolítico por diversas fontes .....	73
Tabela 14 - Eficiência Ecológica por sistema gerador .....	75

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CDR	Centro de Disposição de Resíduos	[-]
CONM	Compostos Orgânicos Não-Metânicos	[-]
COPV	Vaso de Pressão Composta Sobreposta	[-]
GNV	Gás Natural Veicular	[-]
PEM	Membrana de Troca de Prótons	[-]

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_p$	Área de um painel fotovoltaico	[m <sup>2</sup> ]
$A_{tr}$	Área transversal do rotor	[m <sup>2</sup> ]
$C_{Elet}$	Custo da eletricidade da concessionária	[US\$/kWh]
$C_{P_r}$	Coefficiente da potência do rotor	[-]
$C_{ge}$	Custo da eletricidade gerada pelo sistema	[US\$/kWh]
$C_{g^{GSF}}, C_{g^{GE}}, C_{g^{GMCI}}, C_{g^{SH}}$	Custo da eletricidade gerada pelo sistema gerador solar fotovoltaico, eólico, motor de combustão interna, sistema híbrido	[US\$/kWh]
$C_{man_{ge}}, C_{man_{H_2}}$	Custo de manutenção do sistema	[US\$/kWh]
$C_{ope_{ge}}, C_{ope_{H_2}}$	Custo de operação do sistema	[US\$/kWh]
$C_{H_2}$	Custo do hidrogênio gerado pelo sistema	[US\$/kWh]
$C_{comb_{MCI}}$	Custo do biogás	[US\$/kWh]
$C_{H_2O}$	Custo da água	[US\$/m <sup>3</sup> ]
$C_{H_2c}$	Custo do hidrogênio comercial	[US\$/kWh]
$E_{armz}$	Potência elétrica armazenada na compressão do H <sub>2</sub>	[kW]
$E_p$	Potência elétrica em planta solar fotovoltaica	[kW]
$E_{PMCI}$	Potência elétrica produzida no motor-gerador	[kW]
$E_{req}$	Potência elétrica requerida no eletrolisador; Potência requerida no processo de armazenamento	[kW]
$E_{comb_{MCI}}$	Potência suprida pelo biogás	[kW]
$\dot{E}_{GSF}, \dot{E}_{GE}, \dot{E}_{GMCI}$	Energia elétrica gerada pelo sistema gerador solar fotovoltaico, eólico e motor de combustão interna	[kWh]
$\dot{E}_{H_2}$	Energia contida no hidrogênio produzido	[kWh]
$f$	Distribuição de Frequência de Weibull e Rayleigh	[-]
$f$	Fator de anuidade	[1/anos]
$G_{el}$	Receita anual esperada pela eletricidade gerada	[US\$]
$G_{H_2}$	Receita anual esperada pelo hidrogênio gerado	[US\$]
$H$	Período de operação do sistema	[horas/ano]
$Inv$	Investimento feito no sistema	[US\$]

$k$	Período de amortização de capital	[anos]
$\dot{m}_{biogas.MCI}$	Fluxo mássico de biogás no MCI	[kg/s]
$\dot{m}_{H_2}$	Fluxo mássico de hidrogênio produzido	[kg/s]
$P, P_{SH}$	Potência elétrica em planta eólica, sistema híbrido	[kW]
$PAG$	Potencial de aquecimento global	[kgCO <sub>2</sub> /kgH <sub>2</sub> ]
$PCI_{biogas}$	Poder Calorífico Inferior do biogás	[kJ/kg]
$PCI_{H_2}$	Poder Calorífico Inferior do Hidrogênio	[kJ/kg]
$P_{sec(cons)}$	Potência elétrica consumida pelos demais componentes do sistema	[kW]
$P_{sistema}$	Potência do sistema	[kW]
$q$	Juros anual	[-]
$r$	Taxa de juros anual	[%]
$R_A$	Insolação diária média mensal	[kWh/m <sup>2</sup> .dia]
$V$	Velocidade do vento	[m/s]
$\bar{V}$	Velocidade média do vento	[m/s]

## SÍMBOLOS GREGOS

$\varepsilon$	Eficiência ecológica	[-]
$\varepsilon_{GSF}, \varepsilon_{GE}, \varepsilon_{GMCI}, \varepsilon_{SH}$	Eficiência ecológica do sistema gerador solar fotovoltaico, eólico, motor de combustão interna, sistema híbrido	[-]
$\eta_{armz}$	Eficiência do processo de armazenamento do H <sub>2</sub>	[-]
$\eta_{eletrolisador}$	Eficiência do eletrolisador	[-]
$\eta_{eletro.el.SH}$	Eficiência energética do processo de eletrólise pelo sistema híbrido solar-eólico-biogás	[-]
$\eta_{el.solar}, \eta_{el.eolico}, \eta_{el.MCI}$	Eficiência de geração de eletricidade dos painéis solares fotovoltaicos, aerogeradores e do motor de combustão interna a biogás	[-]
$\eta_{pv}$	Eficiência do painel fotovoltaico	[%]
$\pi$	Número Pi	[-]
$\rho$	Massa específica do ar	[kg/m <sup>3</sup> ]

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	18
1.2	OBJETIVOS.....	20
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	21
<b>2</b>	<b>FONTES DE ENERGIAS RENOVÁVEIS</b> .....	<b>22</b>
2.1	ENERGIA SOLAR .....	22
<b>2.1.1</b>	<b>Princípio de Operação</b> .....	<b>23</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Classificação das Células Solares Fotovoltaicas</b> .....	<b>25</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Módulo Fotovoltaico</b> .....	<b>26</b>
2.1.3.1	Ligações das Células em Série e Paralelo .....	26
2.1.3.2	Ponto Quente Devido a Sombreamento Parcial .....	27
2.2	ENERGIA EÓLICA.....	28
<b>2.2.1</b>	<b>Componentes da Turbina Eólica</b> .....	<b>30</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Classificação das Turbinas Eólicas</b> .....	<b>31</b>
2.2.2.1	Turbina Eólica de Eixo Horizontal.....	31
2.2.2.2	Turbina Eólica de Eixo Vertical .....	32
2.3	BIOMASSA, BIOCOMBUSTÍVEL E BIOENERGIA .....	33
<b>2.3.1</b>	<b>Biogás</b> .....	<b>35</b>
2.3.1.1	Biogás de Aterro Sanitário .....	37
2.3.1.2	O Uso de Biogás em Motor de Combustão Interna.....	38
<b>3</b>	<b>TECNOLOGIA DO HIDROGÊNIO</b> .....	<b>39</b>
3.1	MÉTODOS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO .....	40
<b>3.1.1</b>	<b>Produção de hidrogênio através da eletrólise da água</b> .....	<b>40</b>
3.1.1.1	Produção de hidrogênio a partir de energia renovável .....	41
3.2	ARMAZENAMENTO E TRANSPORTE DO HIDROGÊNIO .....	42
<b>3.2.1</b>	<b>Armazenamento e Transporte do Hidrogênio em Estado Gasoso</b> .....	<b>43</b>
3.3	USO DINÂMICO DO HIDROGÊNIO: PRODUÇÃO, ARMAZENAMENTO, ABASTECIMENTO E CONSUMO.....	44
<b>4</b>	<b>ASPECTOS ENERGÉTICOS</b> .....	<b>46</b>
4.1	ESQUEMATIZAÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO DE GERAÇÃO.....	46
4.2	CARACTERÍSTICAS E CONSUMO DO ÔNIBUS HÍBRIDO MOVIDO A HIDROGÊNIO .....	47

4.3	CARACTERÍSTICAS E CONSUMO DO ELETROLISADOR.....	48
4.4	PROCESSO DE ELETRÓLISE.....	49
4.5	RECURSO SOLAR NA CIDADE DE SÃO PAULO.....	50
4.6	POTÊNCIA ELÉTRICA EM PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA .....	51
4.7	RECURSO EÓLICO NA CIDADE DE SÃO PAULO .....	51
4.8	POTÊNCIA ELÉTRICA EM PLANTA EÓLICA .....	52
4.9	DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DE WEIBULL E RAYLEIGH.....	53
<b>4.9.1</b>	<b>Distribuição de Frequência de Ventos na Cidade de São Paulo .....</b>	<b>53</b>
4.10	RECURSO DE BIOGÁS NA CIDADE DE SÃO PAULO.....	54
4.11	MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA A BIOGÁS.....	54
4.12	COMPRESSOR DE HIDROGÊNIO .....	55
4.13	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA HÍBRIDO.....	55
4.14	RESULTADOS DA ANÁLISE ENERGÉTICA .....	58
<b>4.14.1</b>	<b>Resultados do Uso Dinâmico do Hidrogênio: Produção, Armazenamento, Abastecimento e Consumo.....</b>	<b>61</b>
<b>5</b>	<b>ASPECTOS ECONÔMICOS.....</b>	<b>65</b>
5.1	FATOR DE ANUIDADE .....	65
5.2	CUSTO DA ELETRICIDADE GERADA POR PLANTA .....	65
<b>5.2.1</b>	<b>Custo de Manutenção por Planta.....</b>	<b>66</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Custo de Operação por Planta .....</b>	<b>66</b>
5.3	CUSTO DA ELETRICIDADE GERADA PELA PLANTA HÍBRIDA .....	66
5.4	RECEITA ANUAL ESPERADA PELA ELETRICIDADE GERADA.....	67
5.5	CUSTO DO HIDROGÊNIO GERADO POR PLANTA.....	67
<b>5.5.1</b>	<b>Custo de Manutenção por Planta.....</b>	<b>68</b>
<b>5.5.2</b>	<b>Custo de Operação por Planta .....</b>	<b>68</b>
5.6	RECEITA ANUAL ESPERADA PELA HIDROGÊNIO GERADO.....	69
5.7	CUSTO DO ARMAZENAMENTO DO HIDROGÊNIO EM ESTADO GASOSO .....	69
5.8	RESULTADOS DA ANÁLISE ECONÔMICA.....	70
<b>6</b>	<b>ASPECTOS AMBIENTAIS .....</b>	<b>73</b>
6.1	RESULTADOS DA EFICIÊNCIA ECOLÓGICA.....	74
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>76</b>
7.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	77
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>78</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A demanda energética mundial cresce a cada ano e, desde meados do século XVIII, com o advento da Revolução Industrial, os combustíveis de origem fóssil vêm sendo utilizados de forma intensa pelas mais diferentes atividades e pelos setores que compõem a sociedade como um todo. Além desses combustíveis serem altamente poluentes, eles são uma fonte de energia não renovável e, até o fim de 2017, estimava-se que as suas reservas globais comprovadas poderiam durar até 50,2 anos no caso do petróleo, 52,6 anos no caso do gás natural e 134 anos no caso do carvão (BP, 2018). O uso desenfreado desses recursos visando o ganho financeiro e os avanços tecnológicos fizeram com que graves danos fossem causados ao meio ambiente (DIAS, 2010).

Deu-se na década de 50, então, início ao movimento ambientalista em virtude da morte de 1.600 pessoas em Londres, Inglaterra, em 1952, devido à qualidade do ar (DIAS, 2010) e, então, o desenvolvimento sustentável é abordado em praticamente todas as ações e discussões desde a Conferência de Estocolmo em 1972, sendo que as questões energéticas são intrínsecas a esse assunto; assim, a geração de energia constitui-se de uma grande cadeia produtiva, a qual possui grande interação com o meio ambiente (DOS REIS; SANTOS, 2014).

A poluição do ar é atualmente um grande problema ambiental em termos globais, causado principalmente pelas emissões de poluentes industriais originados de um rápido desenvolvimento juntamente com um drástico aumento populacional e um rápido desenvolvimento econômico; estima-se, atualmente, que a cada ano, entre 4 e 7 milhões de pessoas morram prematuramente e centenas de milhões mais adoecem em decorrência da poluição do ar (JACOBSON et al., 2017; ZHU et al., 2017), sendo que o uso de combustíveis à base de carbono é a principal rota de liberação de gases de efeito estufa (GEE), com o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) sendo o principal agente entre eles, e a combustão deles é responsável por cerca de 90 % das emissões de CO<sub>2</sub> (OLIVIER et al., 2016; RAHMAN et al., 2014). Segundo dados da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2018), em sete dias de greve dos caminhoneiros as emissões de poluentes na cidade de São Paulo caíram pela metade em duas estações, Ibirapuera e Cerqueira César. Na tarde do dia 28 de maio, sétimo dia de greve, a qualidade do ar na capital paulista era considerada boa em todas as estações de medição e para todos os poluentes analisados.

As mudanças climáticas são problemas destacados no cenário energético, por isso evita-se o aquecimento de 1,5 °C no clima global desde os tempos pré-industriais, exigindo atualmente, uma conversão de 80 % da infraestrutura de energia em energia de emissão zero até 2030 e 100 % até 2050 (JACOBSON et al., 2017). Muitos dos desastres ecológicos e sociais dos últimos anos têm uma ligação direta com as atividades relacionadas à energia, destacando a necessidade e a importância dos aspectos ambientais do setor de energia para alcançar o desenvolvimento sustentável (DOS REIS; SANTOS, 2014). Reduzir os impactos ambientais é a única maneira de mudar o paradigma do setor energético (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2010).

A necessidade de garantir o suprimento de energia está entre tópicos discutidos no campo energético, no qual há um aumento da preocupação com volume dos estoques de combustíveis fósseis, que podem culminar em instabilidade econômica, social e política (JACOBSON et al., 2017). O uso de fontes de energia renováveis pela sociedade tem sido a principal forma de geração de energia há muito tempo na história e estabeleceu um lugar decisivo no sistema energético "futuro", no entanto, foi interrompido por um curto período de tempo, onde os combustíveis começaram a ser usados de maneira altamente insustentável (SORENSEN, 2007).

Atualmente, os combustíveis fósseis ainda representam cerca de 80 % do consumo global de energia, mas estão sendo substituídos por fontes de energia renováveis e alternativas, pois a importância com o meio ambiente é compreendida e suas tecnologias têm uma redução de preço (BP, 2018; OH; CHUA; GOH, 2011; RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY, 2017). A proposta de diversificar a matriz energética mundial com a inserção de fontes renováveis de energia é a melhor solução para garantir um futuro sustentável para as próximas gerações (LUND; SALGI, 2009; WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT, 1987).

A crescente preocupação em assegurar um futuro sustentável e também uma segurança energética (KAR; SINHA, 2014) faz com que a utilização de fontes renováveis para a produção de energia desempenhe um papel proeminente em todo o mundo (SHARMA; TIWARI; SOOD, 2012). Por essa razão, o uso de outras fontes de energia como as renováveis estão sendo consideradas, pois são formas de energia que são naturalmente reabastecidas em nosso planeta e possuem uma menor quantidade de emissão de CO<sub>2</sub> e GEE (NOVAKOVIC; NASIRI, 2016; YOUNGER et al., 2008), fazendo novas oportunidades para o uso de recursos renováveis para a geração de energia (OH; CHUA; GOH, 2011; ONG; MAHLIA; MASJUKI, 2011).

As fontes renováveis podem ser separadas em duas categorias, tradicional e moderna, já que exemplos de fontes tradicionais são a hidroelétrica e a biomassa, e, como exemplos das modernas, são o vento, as ondas, as marés, a solar e a geotérmica; algumas formas de combustíveis criadas a partir de biomassa também se enquadram nessa categoria (NOVAKOVIC; NASIRI, 2016). De acordo com Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup> Century (2017), o uso das principais fontes de energia renovável para geração de eletricidade (incluindo hidroelétrica), para aquecimento e como combustível, tiveram aumento aproximado de 8 %, 4,6 % e 1 %, respectivamente, de 2015 a 2016. Mas, embora tenha havido um crescimento na utilização de fontes renováveis nos últimos anos, a sua percentagem do consumo total de energia estimado em 2015 foi de cerca de 19,3 % do total.

Ainda há um longo caminho para a energia proveniente de fontes renováveis substituir completamente as fontes de origem fóssil. Há mais de três décadas, formas alternativas de geração de energia estão sendo estudadas e pesquisadas para mitigar os danos causados ao meio ambiente pelo uso indiscriminado de combustíveis fósseis.

A implementação de uma economia baseada no hidrogênio, a qual depende dele como combustível comercial para fornecimento de uma fração considerável dos serviços e da energia, possibilita o desenvolvimento sustentável de uma sociedade. Contudo, tal modelo torna-se viável se o hidrogênio for produzido de forma econômica e de modo a não prejudicar o meio ambiente. O uso de energia proveniente de recursos de renováveis é uma opção coerente com esse modelo econômico para geração de eletricidade a fim de ser utilizada na produção de hidrogênio; ele por sua vez, é um vetor energético, uma forma de armazenamento de energia, ou seja, não é uma fonte primária de energia. (NEHRIR; WANG, 2016).

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é estudar a geração de energia elétrica em um sistema híbrido solar-eólico-biogás para a produção de hidrogênio, por meio do processo de eletrólise da água, considerando o seu armazenamento e o seu uso dinâmico como combustível veicular.

Tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Analisar todos os processos sobre o ponto de vista energético, de modo a permitir a determinação da sua eficiência global da planta proposta;
- Analisar o uso dinâmico, que se constitui no monitoramento constante do nível de hidrogênio armazenado a fim de saber qual o volume mínimo para que seja acionada a

produção do mesmo, e o processo de armazenamento, para que não falte hidrogênio segundo o consumo estipulado;

- Analisar todos os processos sobre o ponto de vista de engenharia econômica, a fim de determinar a viabilidade econômica da planta proposta;
- Analisar todos os processos sobre o ponto de vista de ambiental, a fim de determinar o quão poluente é o processo proposto de produção de hidrogênio.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação foi dividida em oito capítulos, os quais são descritos resumidamente a seguir.

O capítulo 1 refere-se a uma introdução ao assunto estudado neste trabalho, a sua estrutura e seus objetivos.

O capítulo 2 refere-se aos estudos dos aspectos técnicos das tecnologias de energia solar, energia eólica e bioenergia no processo de geração de energia elétrica.

O capítulo 3 refere-se aos estudos dos aspectos técnicos dos processos de produção do hidrogênio, seus métodos de armazenamento, transporte e posterior uso dinâmico como combustível veicular.

O capítulo 4 refere-se à configuração para composição do sistema híbrido de geração (solar-eólico-biogás) para produção hidrogênio veicular.

O capítulo 5 refere-se à análise do potencial energético de geração de energia elétrica do sistema híbrido proposto para a produção de hidrogênio.

O capítulo 6 refere-se a análise econômica do sistema híbrido proposto, a fim de determinar os custos de investimentos, de operação, de manutenção, de geração de eletricidade, de produção de hidrogênio e o tempo de retorno (*payback*).

O capítulo 7 refere-se à análise dos impactos ambientais do sistema proposto utilizando os estudos ambientais para o cálculo da eficiência ecológica, a fim de averiguar quão poluidores são as tecnologias que compõem o sistema híbrido.

O capítulo 8 refere-se às conclusões finais do estudo para a dissertação, mostrando de forma geral os resultados obtidos em cada uma das análises realizadas do sistema proposto.

## 2 FONTES DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

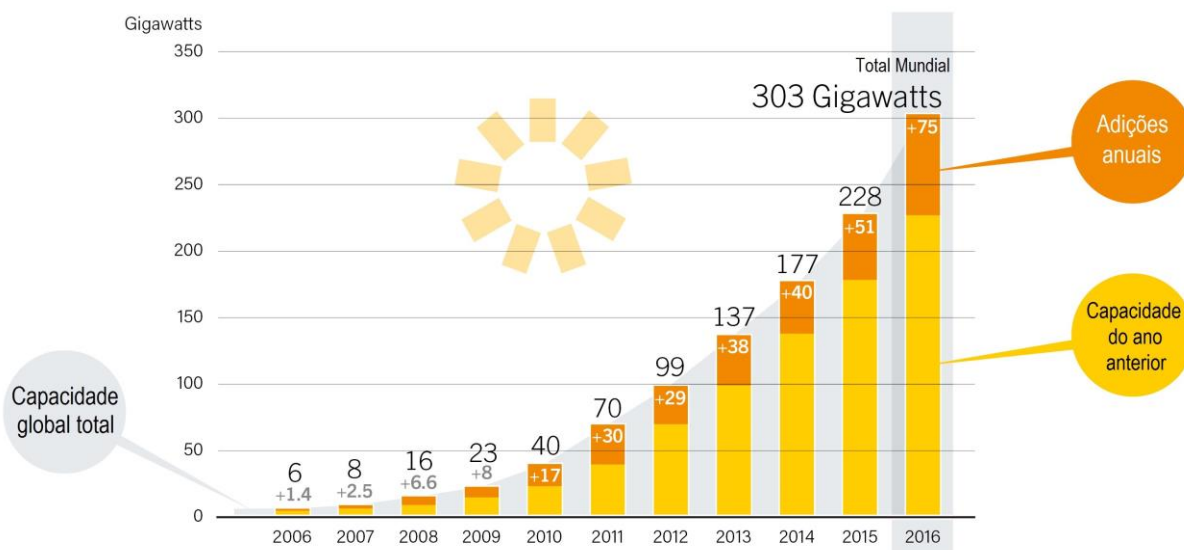
### 2.1 ENERGIA SOLAR

O uso da radiação solar para promover conforto e conveniência vem sendo aplicado há muitos anos, desde o século V a.C., quando os gregos projetaram os sistemas solares passivos a fim de utilizar a radiação solar para aquecer as casas durante o período de inverno. Ao longo dos anos esta técnica foi melhorada devido aos avanços no processo de produção do vidro e aplicações da mica, que selam e evitam que o calor escape durante o dia (HAQUE, 2016).

Em 1890, nos Estados Unidos, o primeiro aquecedor solar de água foi comercializado. Mas somente em 1950, os cientistas da Bell Labs desenvolveram as primeiras células fotovoltaicas comerciais e foram capazes de converter a radiação solar em eletricidade, que era usada para alimentar equipamentos elétricos. Essas células fotovoltaicas foram aplicadas em programas espaciais para alimentar os satélites. Com os avanços tecnológicos, este equipamento começou a ter seu custo final diminuído e a ganhar aplicações domésticas (ELDIN; REFAEY; ABDELRAHMAN, 2015; HAQUE, 2016).

Atualmente, o uso da tecnologia de painéis fotovoltaicos é a mais aceita para o uso de fontes renováveis para geração de energia. A geração de energia a partir da radiação solar tem como característica a intermitência (não linearidade), devido às condições ambientais, o que gera uma oscilação na produção de energia elétrica. Como pode ser observado na Figura 1, tem havido um grande aumento na capacidade fotovoltaica solar total global, o que pode ser interpretado como um aumento na produção e comercialização de painéis fotovoltaicos, bem como a aceitação da população. (HAQUE, 2016; MARKVART; CASTANER; MCEVOY, 2013).

Figura 1 - Capacidade solar fotovoltaica e adições anuais, 2006-2016



Fonte: Adaptado de Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup> Century (2017).

O sistema de energia solar ativa (célula solar fotovoltaica), tem como objetivo principal a conversão da radiação solar em energia elétrica. Conhecido como o efeito fotovoltaico, o cientista Edmund Becquerel, que descobriu este conceito em 1839. O efeito fotovoltaico teve seu primeiro estudo em sólidos como o selênio em 1870, mas a eficiência da conversão do selênio solar foi entre 1-2 % e também foi muito caro (ELDIN; REFAEY; ABDELRAHMAN, 2015; HAQUE, 2016).

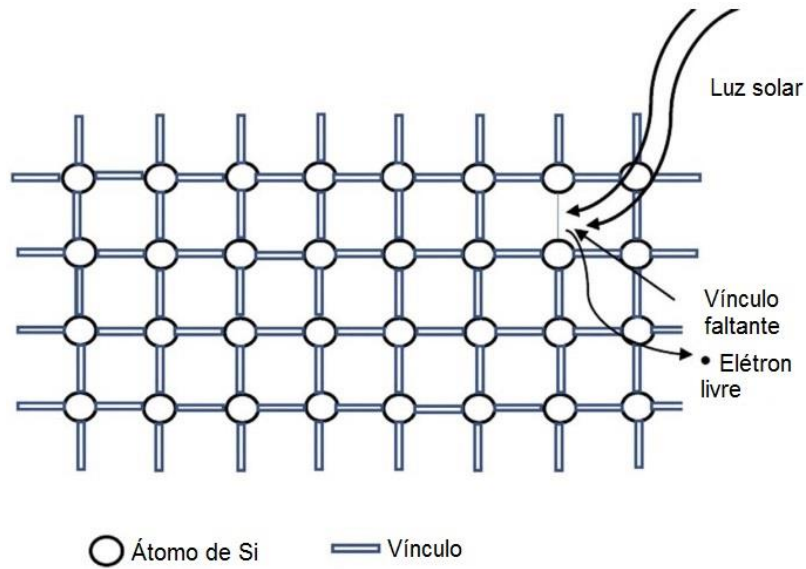
Devido aos avanços na pesquisa nesta área, um método foi desenvolvido para produzir silício cristalino altamente puro nos anos 50 e em 1954, o Bell Labs desenvolveu células fotovoltaicas de silício, que tinham 4 % de eficiência, que ainda melhoraram para 11 %. A partir deste momento, uma nova era de células produtoras de energia começou. Um satélite espacial norte-americano fez uso de uma pequena série de células para alimentar seu rádio em 1958 (HAQUE, 2016).

### 2.1.1 Princípio de Operação

A luz solar é composta de fótons, que contém diferentes quantidades de energias correspondentes a vários comprimentos de onda da luz. Quando os fótons atingem uma célula fotovoltaica, eles podem ser absorvidos, refletidos ou passar por essas células. A absorção dos fótons na célula solar resulta na geração de um par inteiro de elétrons e esta geração de pares inteiros de elétrons resulta na geração de uma tensão que pode conduzir a corrente em um

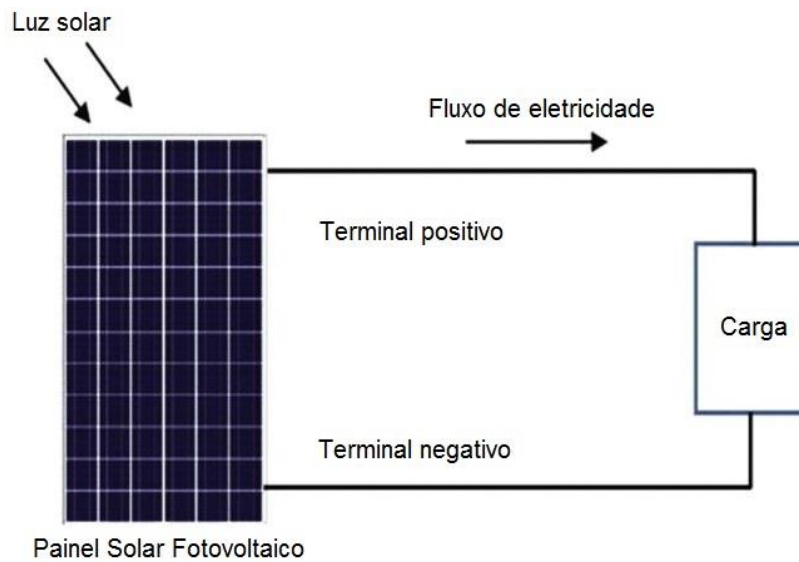
circuito externo. Na Figura 2 pode-se observar o efeito da luz sobre uma célula fotovoltaica de silício e na Figura 3 é possível observar a conexão de uma célula fotovoltaica a uma carga/circuito externo. (HAQUE, 2016).

Figura 2 - Efeito da luz em uma célula fotovoltaica de silício



Fonte: Adaptado de Haque (2016).

Figura 3 - Conexão de uma célula fotovoltaica a um circuito de carga externo



Fonte: Adaptado de Haque (2016).

### 2.1.2 Classificação das Células Solares Fotovoltaicas

As células solares fotovoltaicas são feitas de silício, que está disponível em abundância, e elas podem ser categorizadas pelas tecnologias de fabricação (HAQUE, 2016), como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Células solares fotovoltaicas categorizadas por suas tecnologias, eficiências de conversão e vida útil

<b>Tecnologias de Fabricação</b>	<b>Eficiência de Conversão (%)</b>	<b>Vida útil (anos)</b>
<b>Primeira Geração</b>		
Monocristalino	até 20	25 – 30
Policristalino	14 – 17	20 – 25
String Ribbon	próximo de 16	–
<b>Segunda Geração</b>		
Amorfo	4 – 8	–
Telureto de cádmio	16	–
Cobre-Índio-Gálio-Selênio/ Cobre-Índio-Seleneto	7 – 16	–
<b>Terceira Geração</b>		
Concentração fotovoltaica	acima de 30	–
Refrigeração de fotovoltaicos de concentração	Varia conforme a concentração fotovoltaica	–
Orgânica	4 – 5	–
Sensibilizado por corante	14	–

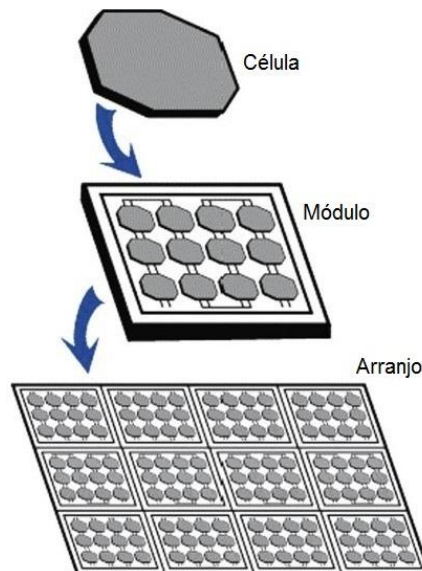
Fonte: Eldin; Refaey; Abdelrahman (2015); Haque (2016);  
Markvart; Castaner; Mcevoy (2013).

A mais recente tecnologia aplicada em células solares de silício nanoestruturadas é o silício negro como forma de aprimoramento das células (ELDIN; REFAEY; ABDELRAHMAN, 2015).

### 2.1.3 Módulo Fotovoltaico

Uma célula solar é uma unidade básica e cada célula pode produzir uma pequena quantidade de energia dependendo de sua eficiência. Tipicamente, a área de uma célula é de  $225 \text{ cm}^2$  e a energia gerada por área varia de  $10$  a  $25 \text{ mW/cm}^2$ , representando entre  $10$  e  $25 \%$  de eficiência por célula. Sendo considerada uma eficiência de  $10 \%$ , a potência máxima gerada seria de  $2,25 \text{ Wp}$ . Para atender a altos níveis de potência, as células são conectadas em combinações em série/paralelas para que os módulos sejam formados, que atualmente têm uma faixa de potência de  $3$  a  $200 \text{ Wp}$  e podem ser conectados para matrizes a serem formadas, como pode ser observado no Figura 4 (HAQUE, 2016).

Figura 4 - Célula solar fotovoltaica, módulo e arranjo



Fonte: Adaptado de Haque (2016).

#### 2.1.3.1 Ligações das Células em Série e Paralelo

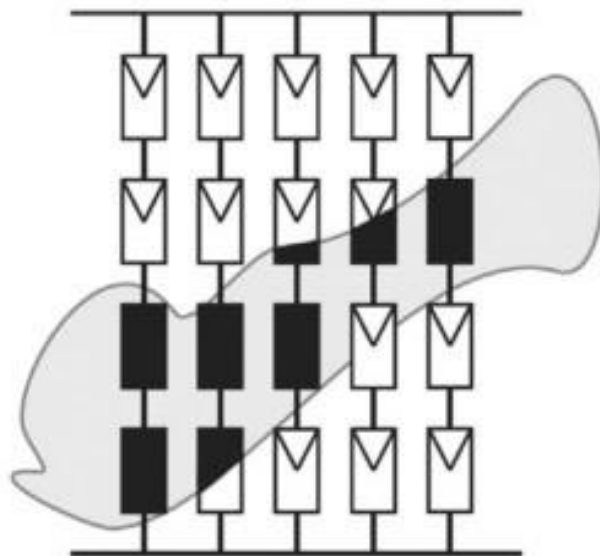
As conexões em série e paralelas de células solares são feitas para gerar alta potência. Para aumentar a tensão de saída, as células solares são conectadas em série e, para aumentar a corrente de saída, elas são conectadas em paralelo. Para fazer conexões em série e paralelas, assume-se que todos os parâmetros das células solares são idênticos (HAQUE, 2016).

### 2.1.3.2 Ponto Quente Devido a Sombreamento Parcial

No módulo fotovoltaico solar, existem muitas células conectadas em série e pode acontecer em tempo nublado que uma ou mais células do arranjo não recebam luz solar como pode ser visto na Figura 5. Sob condições de curto-circuito, as células sombreadas se tornarão polarizada reversamente e serão forçadas a trabalhar na tensão de polarização ( $V_{bias}$ ) para manter a mesma corrente (Figura 6). Esta situação pode levar a perda de energia nas células parcialmente sombreadas e devido ao excesso de calor, estas células podem ser danificadas completamente. Além disso, a tensão negativa pode levar o diodo a reverter a tensão de ruptura e pode levar ao mesmo resultado, ou seja, quebra. Devido a este efeito, a cadeia tornar-se-á em circuito aberto e o sistema de geração de energia solar poderá falhar.

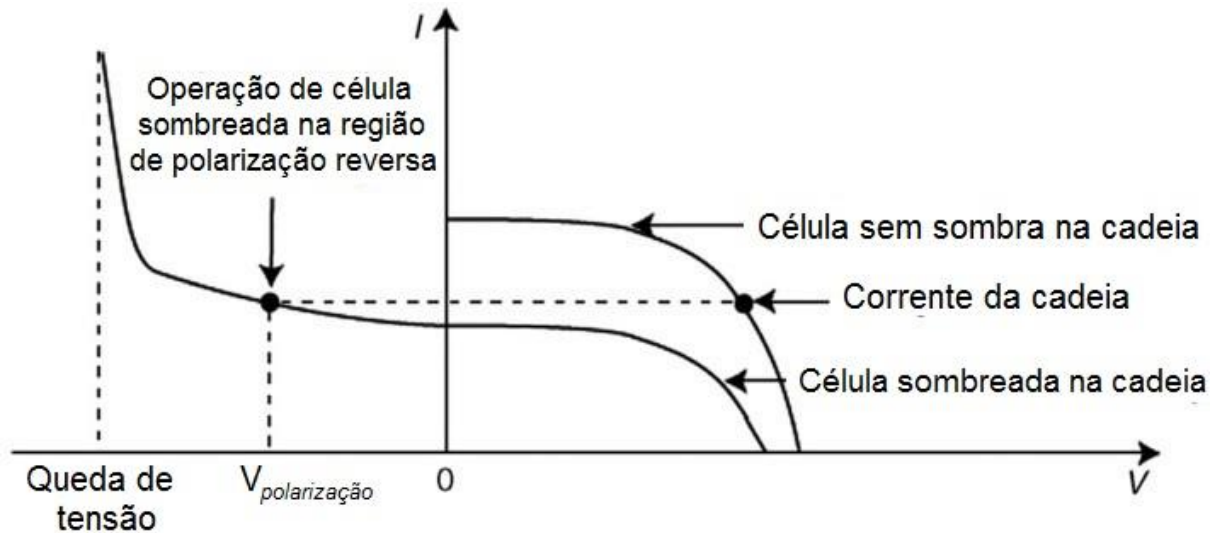
Devido à operação de polarização reversa, a célula gera calor, que é tratado como ponto aquecido no sistema fotovoltaico. Esses pontos de acesso e falhas podem ser evitados usando-se diodos de derivação. Esses diodos são conectados em paralelo às células para limitar a tensão reversa e, portanto, a perda de energia nas células sombreadas (BIDRAM; DAVOUDI; BALOG, 2012).

Figura 5 - Condição de sombreamento parcial



Fonte: Bidram, Davoudi, Balog (2012).

Figura 6 - I-V curva sob condição de sombreamento parcial



Fonte: Adaptado de Bidram, Davoudi e Balog (2012).

## 2.2 ENERGIA EÓLICA

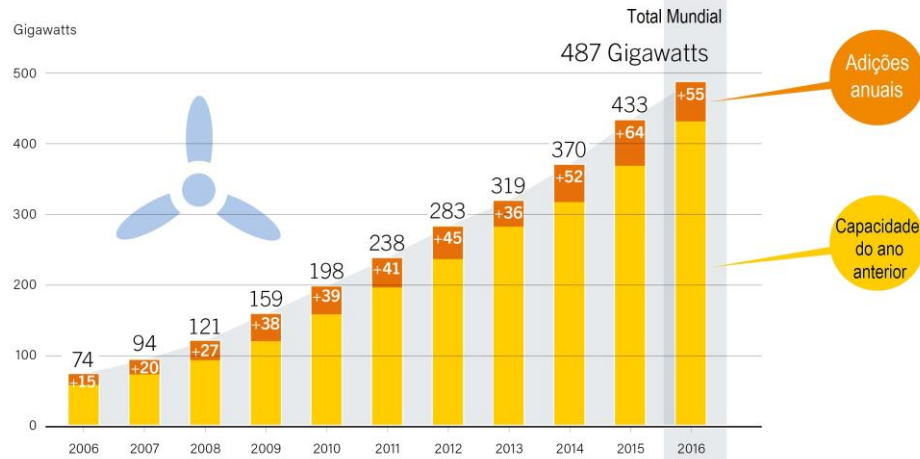
A turbina eólica é a peça-chave em um sistema de energia eólica porque é através dela que a energia cinética do vento é convertida em energia mecânica e depois em energia elétrica (BEIG; MUYEEN, 2016).

Levantar a água é um dos usos dos moinhos de vento e nesse processo houve a conversão da energia eólica em energia mecânica. O uso de moinhos de vento para elevação de água é relatado na história de 644 a.C. e até o século XX, diferentes tipos de aerogeradores foram utilizados em diferentes tipos de aplicação, tais como, elevação de água, bombeamento de água, levantamento de materiais pesados, entre outros (BEIG; MUYEEN, 2016).

O cientista dinamarquês Poul La Cour, em 1891, conseguiu produzir eletricidade sob a forma de corrente contínua a partir de uma turbina eólica, que se baseava principalmente na tecnologia tradicional dos moinhos de vento, sendo capaz de produzir pequenas quantidades de eletricidade. Desde então, tem havido grandes melhorias na tecnologia de turbinas eólicas, o que permite o uso eficiente e eficaz da energia eólica em todo o mundo (BEIG; MUYEEN, 2016).

Observa-se na Figura 7 a evolução da energia eólica mundialmente ao longo dos anos.

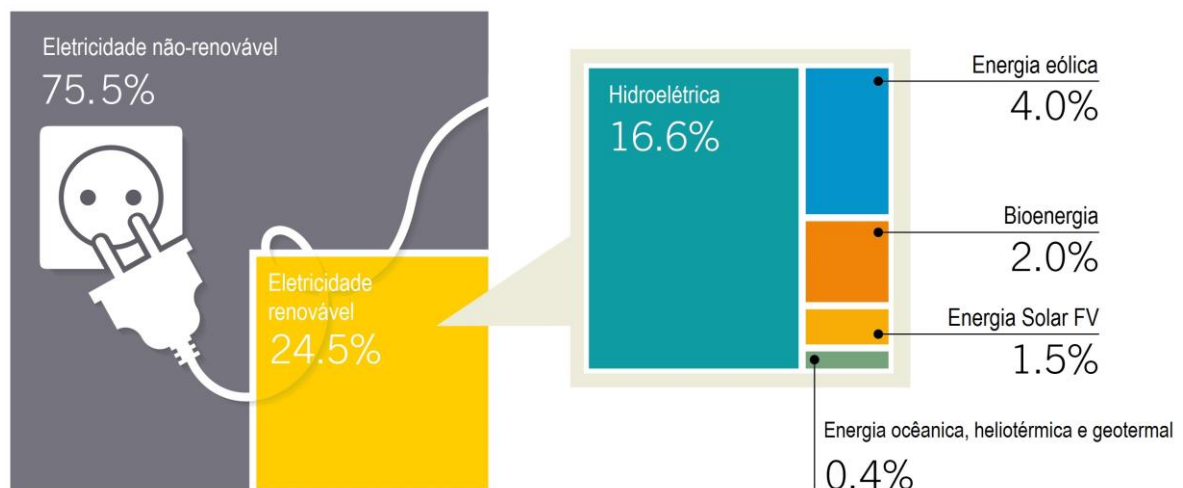
Figura 7 - Capacidade de energia eólica e adições anuais, 2006-2016



Fonte: Adaptado de Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup> Century (2017).

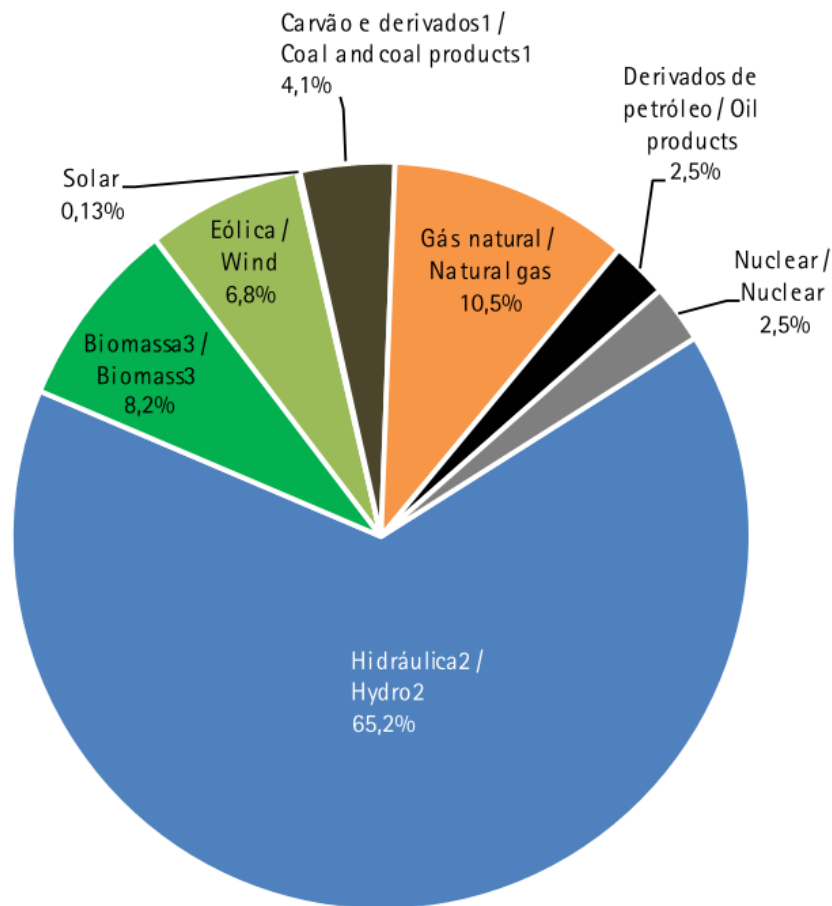
Entre todas as fontes de energia renováveis, a energia eólica tem um grande potencial para se tornar uma das mais importantes fontes de energia renovável para o mundo moderno, porque é uma tecnologia de geração de energia limpa e livre de emissões. O Conselho Mundial de Energia Eólica (GWEC) prevê que a energia eólica pode chegar a quase 2.000 GW até 2030, fornecendo entre 16,7 % e 18,8 % da eletricidade global (Figura 8) e assim evitar a emissão de mais de 3 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> anualmente (BEIG; MUYEEN, 2016).

Figura 8 - Participação de Energia Renovável Estimada da Produção Global de Eletricidade, Final de 2016



Fonte: Adaptado de Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup> Century (2017).

Figura 9 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte no Brasil



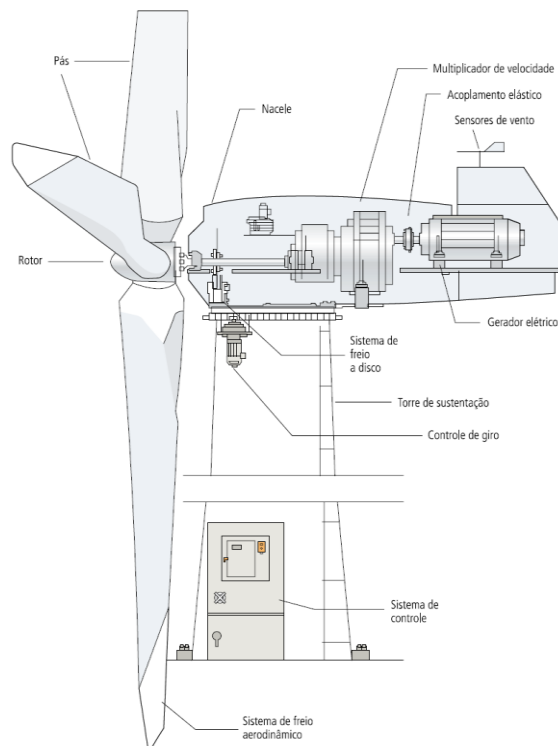
Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2018).

Ao cruzar as informações fornecidas nas Figuras 7 e 8 com a previsão do GWEC, é possível ter uma visão geral do desenvolvimento da energia eólica e entender que não será fácil alcançar o valor previsto, no entanto, é visto que todos os dias mais esforços visam o uso de fontes renováveis, como a eólica.

### 2.2.1 Componentes da Turbina Eólica

Consolidou-se como características de uma turbina eólica horizontal da seguinte forma: pás do rotor, caixa de engrenagens, nacelle, gerador, torre, multiplicador de velocidade, freios, anemômetro e ângulo de inclinação (sensores de vento), como pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 - Componentes de uma turbina eólica de eixo horizontal



Fontes: Agência Nacional de Energia Elétrica (2005); Beig; Muyeen (2016).

## 2.2.2 Classificação das Turbinas Eólicas

Com base no projeto estrutural das turbinas eólicas, elas podem ser classificadas em duas categorias, como eixo horizontal e eixo vertical.

### 2.2.2.1 Turbina Eólica de Eixo Horizontal

A turbina eólica de eixo horizontal é o tipo de turbina eólica comercialmente estabelecido e mais vendido. A principal vantagem deste tipo de turbina é que, usando o controle de passo da lâmina, a velocidade do rotor e a potência podem ser controladas, o controle de passo da lâmina ainda protege a turbina de velocidade excessiva, o que pode danificar o sistema. Como o princípio operacional básico deste tipo de turbina eólica é baseado em conceitos semelhantes a hélices, os avanços tecnológicos do projeto da hélice são facilmente incorporados para desenvolver turbinas eólicas modernas e altamente eficientes. A Figura 11 mostra o arranjo esquemático de uma turbina eólica de eixo horizontal (BEIG; MUYEEN, 2016).

Figura 11 - Esquema de uma turbina eólica de eixo horizontal

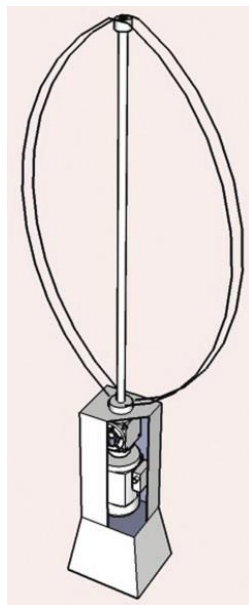


Fonte: Beig; Muyeen (2016).

#### 2.2.2.2 Turbina Eólica de Eixo Vertical

A turbina eólica de eixo vertical foi proposta por Darrieus em 1925 e neste tipo de turbina as pás são curvas e o rotor tem rotação vertical, como pode ser observado no diagrama esquemático da turbina do eixo vertical do tipo Darrieus na Figura 12 (BEIG; MUYEEN, 2016).

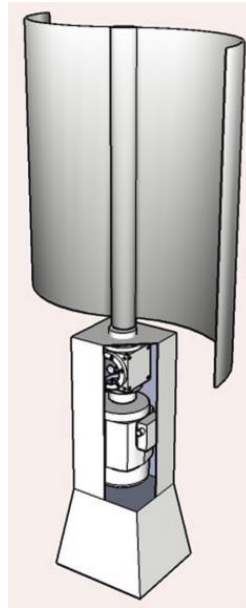
Figura 12 - Esquema da turbina do eixo vertical do tipo Darrieus



Fonte: Beig; Muyeen (2016).

Se comparado com o da turbina eólica de eixo horizontal, a forma das pás do eixo vertical é complicada, dificultando a sua fabricação. A turbina eólica de eixo vertical do tipo Savonius usa lâminas pás curvas, como pode ser visto na Figura 13, onde elas são fixadas a um rotor central (BEIG; MUYEEN, 2016).

Figura 13 - Esquema da turbina do eixo vertical do tipo Savonius



Fonte: Beig; Muyeen (2016).

Existem outros tipos de turbinas eólicas de eixo vertical do tipo H e V. O gerador usado na turbina eólica de eixo vertical tem um projeto simples, portanto o gerador é montado no solo e a torre é necessária apenas para montar as pás. Como desvantagens podem ser apontadas a razão de velocidade de ponta e a potência de saída que são muito baixas em comparação com os geradores de eixos horizontais, a turbina não é autoiniciativa, isto é, ela precisa de um impulso inicial para iniciar. Além disso, não é possível controlar a potência de saída ao lançar as pás do rotor. Os fios de suporte ou fios de cara são necessários, além da torre (BEIG; MUYEEN, 2016).

### 2.3 BIOMASSA, BIOCOMBUSTÍVEL E BIOENERGIA

Nos dias de hoje, a biomassa apresenta-se como uma das respostas mais promissoras para produção de energia, em particularmente para combustíveis de transporte (DA SILVA; CHANDEL, 2014).

Segundo o Ministério de Minas Energia e a Empresa de Pesquisa Energética (2007), a biomassa é classificada como recurso energético nas categorias de biomassa energética florestal, agrícola e da produção animal; e rejeitos urbanos. Os biocombustíveis referem-se aos diferentes tipos de biomassa e aos produtos refinados a serem queimados para produção de energia. Eles existem em formas sólidas, líquidas e gasosas, assim com os combustíveis de origem fóssil (GUO; SONG; BUHAIN, 2015).

O homem tem utilizado bioenergia e biocombustíveis para fins domésticos desde a pré-história. A madeira foi queimada para produzir calor e luz para cozinhar alimentos, iluminar a noite, aquecer ambientes e tratar artefatos de argila. Antes do século XIX, a madeira era o combustível predominante para cozinhar e aquecer e o óleo vegetal era o principal combustível para a iluminação em todo o mundo (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2013).

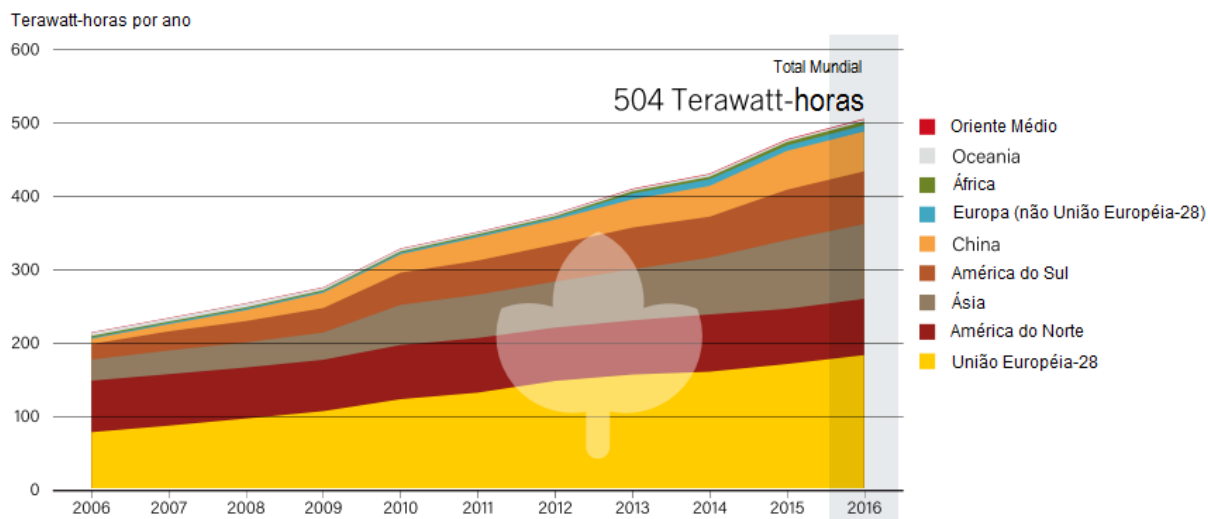
Os incentivos que vêm ocorrendo nas últimas décadas para mitigar a mudança climática global estimulam ainda mais as comunidades internacionais a investir no desenvolvimento e na utilização de energia renovável. Das fontes de energia renováveis, a bioenergia atrai grandes e particulares empreendimentos de desenvolvimento, principalmente devido à extensa disponibilidade de biomassa, já existentes de tecnologias de produção de biomassa e infraestrutura, e a biomassa sendo a única matéria-prima para combustíveis líquidos. Atualmente, a produção comercial de eletricidade e combustíveis de transporte a partir de matérias-primas de biomassa é praticada na maioria das nações (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2012).

Atualmente, a produção primária terrestre anual adiciona aproximadamente  $120 \times 10^{15}$  g de biomassa vegetativa seca, o que corresponde a um armazenando  $2,2 \times 10^{21}$  J de energia em materiais vegetais e a demanda mundial de energia em 2010 foi de  $5,5 \times 10^{20}$  J. A previsão de aumento é  $8,6 \times 10^{20}$  J até 2040. Em grande parte, a bioenergia capturada a cada ano pelas usinas terrestres é 3 a 4 vezes maior que as demandas de energia mundial, o que faz ficar evidente o potencial de entrega de bioenergia. A área terrestre total do mundo, excluindo terras cultiváveis, infraestrutura, floresta selvagem e florestas mais densas, tem estimado um potencial de  $190 \times 10^{18}$  ano<sup>-1</sup>, 35 % da atual demanda global de energia (GUO; SONG; BUHAIN, 2015).

O Brasil é o quarto maior país do mundo em produção de biomassa devido as suas condições geoclimáticas; terrenos férteis apropriados, chuva, luz e água. O país é referência o programa de energia renovável no mundo e ocupa o segundo lugar na produção de etanol. O

governo do Brasil tomou iniciativas significativas para tornar o programa de bioenergia um sucesso (DA SILVA; CHANDEL, 2014).

Figura 14 - Geração Global de Bioenergia, por Região, 2006-2016 em Terawatt-horas por ano



Fonte: Adaptado de Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup> Century (2017).

### 2.3.1 Biogás

O biogás é uma alternativa renovável de combustível gasoso. Ele é gerado pela digestão anaeróbica de resíduos orgânicos. A sua composição bruta consiste em aproximadamente 60-65 % de metano ( $\text{CH}_4$ ), 30-35 % de  $\text{CO}_2$  e pequenas porcentagens de vapor de água,  $\text{H}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ . Após a purificação para remover  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e outras impurezas, o biogás passa a ter uma qualidade de duto (agora denominado biometano) e é usado como um substituto do gás natural. Resíduos orgânicos são gradualmente decompostos por microrganismos em moléculas menores no ambiente natural, já em condições com suprimento de ar suficiente, os produtos de decomposição final são geralmente  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ . Em circunstâncias como aterros sanitários e lagoas de esterco onde há pouco oxigênio disponível, um ambiente anaeróbico se forma, e certos microrganismos decompõem os resíduos orgânicos em  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ . A decomposição microbiana de materiais de biomassa na ausência de oxigênio é denominada digestão anaeróbica. Quatro etapas biológicas básicas estão envolvidas na digestão anaeróbica (WEILAND, 2010):

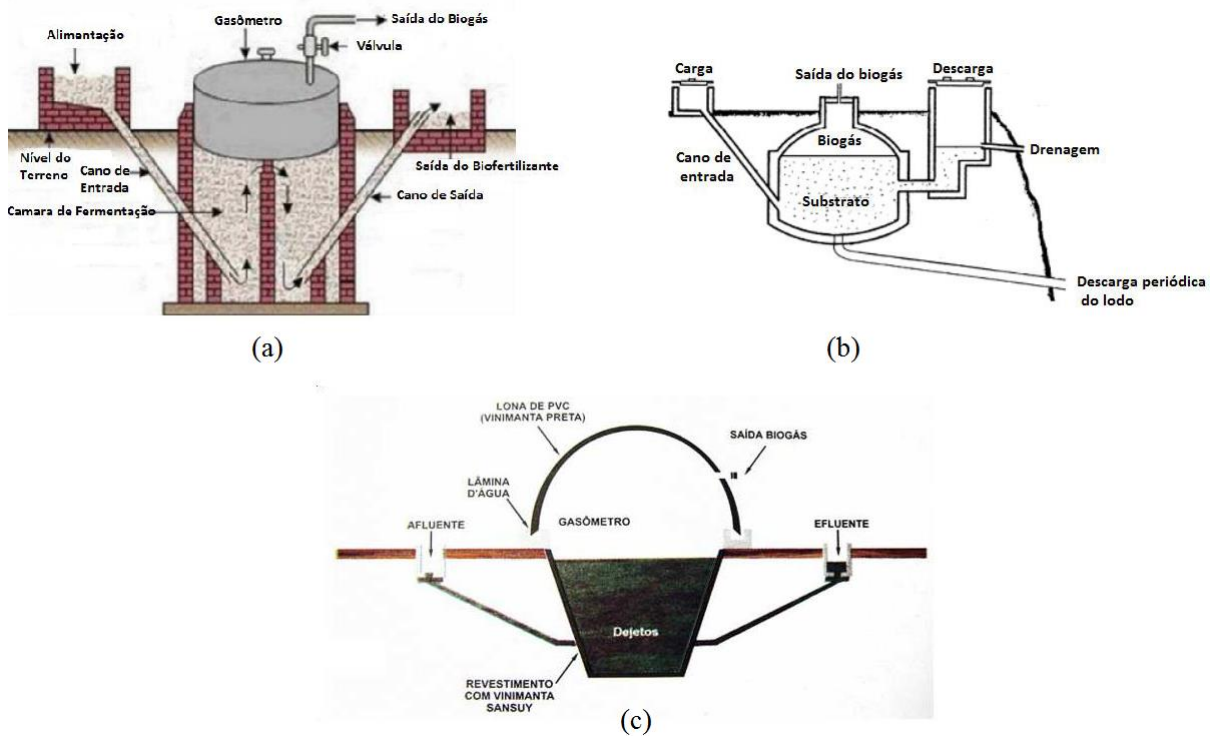
- 1. Hidrólise:** O processo no qual as bactérias anaeróbicas tais como bactericidas, clostridia, bifidobacteria, streptococci e enterobacteriaceae hidrolisam grandes moléculas orgânicas em moléculas menores e simples.
- 2. Acidogênese:** O processo no qual as bactérias acidogênicas convertem moléculas orgânicas simples em dióxido de carbono, hidrogênio, amônia e ácidos orgânicos.
- 3. Acetogênese:** O processo no qual as bactérias acetogênicas convertem ácidos orgânicos em ácido acético, juntamente com hidrogênio, amônia e dióxido de carbono adicionais.
- 4. Metanogênese:** O processo no qual as bactérias metanogênicas decompõem o ácido acético em metano e dióxido de carbono.

A reação geral da digestão anaeróbica é como:



A digestão anaeróbica tem sido utilizada por fazendas, estações de tratamento de esgoto (ETE) e até por domicílios a fim de gerenciar resíduos e/ou produzir energia. Geralmente, resíduos orgânicos em suspensão de água são colocados em um recipiente hermético denominado “digestor anaeróbico” (Figura 15). Após 7 a 14 dias, o biogás começará a ser gerado e dependendo da temperatura e dos tipos de resíduos, em um período de 30 a 60 dias são necessários para que a digestão anaeróbica seja completa (MATA-ALVAREZ; MACÉ; LLABRÉS, 2000).

Figura 15 - Estrutura dos modelos mais usuais de digestores: (a) indiano, (b) chinês e (c) batelada



Fonte: Adaptado de Paulino (2017).

### 2.3.1.1 Biogás de Aterro Sanitário

Em decorrência do aumento da produção industrial, populacional e urbanização houve um aumento do consumo de bens e serviços resultando na geração de resíduos sólidos, com uma maior concentração em áreas urbanas, onde há um acúmulo não só de resíduos públicos, mas também domésticos, sendo denominados resíduos sólidos urbanos. O processo tratamento e descarte que eles sofrem no Brasil podem ser feitos em aterros a céu aberto, que é a maneira inadequada de se conduzir o processo, ou em aterro controlado e regulado (BARROS; FILHO; DA SILVA, 2014).

Em decorrência de um ambiente prevalentemente anaeróbico nos aterros sanitários a degradação da matéria orgânica resulta em produtos como lixiviados, sendo uma mistura de água pluvial e lama que flui pela célula do aterro, e o biogás, composto em uma maioria por metano ( $\text{CH}_4$ ; 50-60 %), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ; 40-50 %) e pequenos vestígios de outros gases, como nitrogênio ( $\text{N}_2$ ; 5 %), sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ; <1 %) e compostos orgânicos não-metânicos (CONM; 2700 parte por milhão por volume). Um percentual do metano gerado em aterros sanitários pode ser capturado e usado como fonte de energia renovável. O seu

poder calorífico é satisfatoriamente alto para permitir sua aplicação como combustível em processos de combustão, como os de motores de combustão interna e a produção de eletricidade (BARROS; FILHO; DA SILVA, 2014).

#### 2.3.1.2 O Uso de Biogás em Motor de Combustão Interna

O uso do biogás em motores de combustão interna é uma opção viável, visto que o seu uso é datado antes da Segunda Guerra Mundial, quando veículos na Europa passaram a utilizar o gás de esgoto como combustível (DOS SANTOS, 2016).

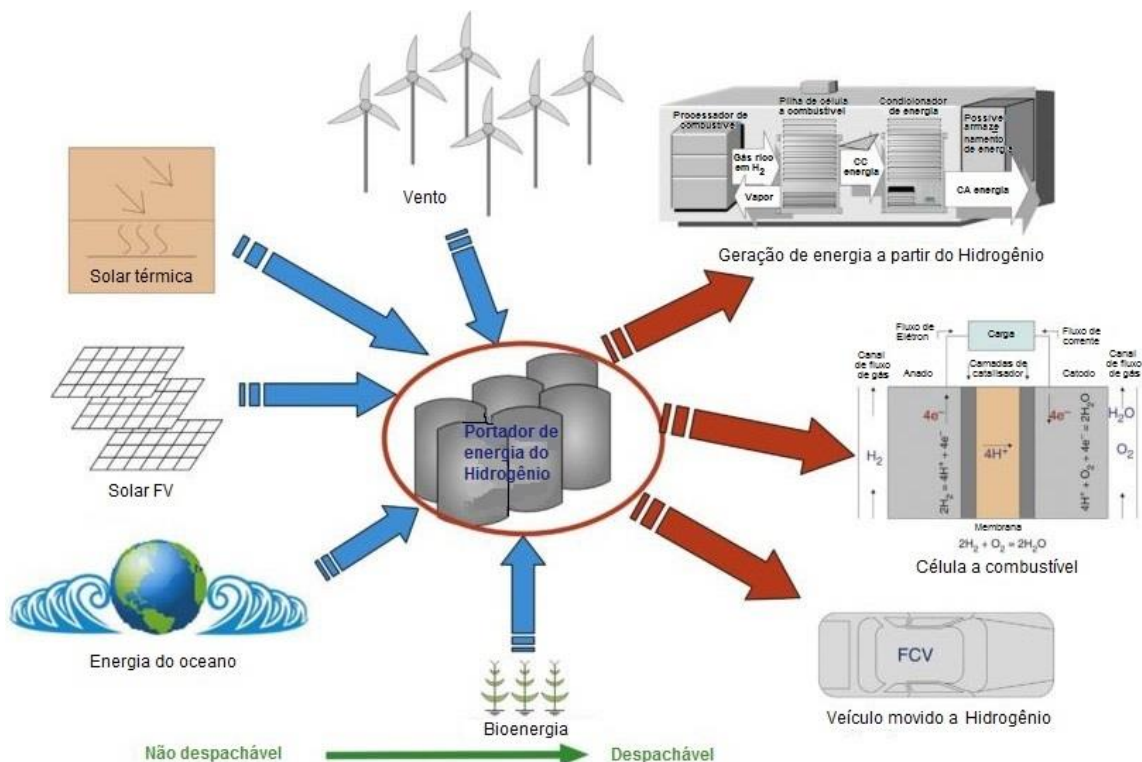
Atualmente, não há mais a necessidade de realizar modificações nos motores de combustão interna para que seja utilizado biogás como combustível, já há empresas investindo na fabricação de motores para serem abastecidos com biogás.

### 3 TECNOLOGIA DO HIDROGÊNIO

O hidrogênio como vetor de energia, tem a maior densidade de energia (120 MJ/kg) entre todos os combustíveis, além de ser livre de emissões, ele pode ser usado como combustível em praticamente qualquer aplicação, onde os combustíveis fósseis são usados atualmente – seja industrial, transporte, doméstico ou espacial. Ele tem o potencial de ser produzido e comercializado em massa, baseando a sociedade em uma economia de hidrogênio, a qual é baseada na dependência do hidrogênio como fonte de energia (combustível comercial) que representaria uma fração substancial da energia e dos serviços de uma nação. Para que essa visão torne-se realidade, o hidrogênio deve ser produzido a partir de fontes domésticas de energia de maneira econômica e com pouco impacto no meio ambiente e a tecnologia de célula de combustível também deve se tornar madura e economicamente viável (NEHRIR; WANG, 2016; SINGH et al., 2015).

Na Figura 16 pode-se observar o diagrama esquemático da visão para uma sociedade centrada no hidrogênio, na qual diferentes recursos de energia renovável são usados aplicadas para produção e o armazenamento de hidrogênio.

Figura 16 - Diagrama esquemático de uma sociedade de economia de hidrogênio, baseado em recursos de energia renovável para produção e armazenamento de hidrogênio



Fonte: Adaptado de Nehrir e Wang (2016).

### 3.1 MÉTODOS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

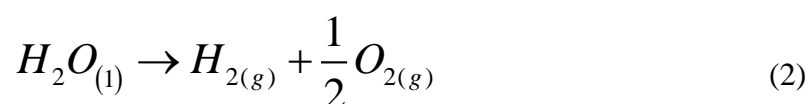
O hidrogênio é o elemento mais abundante do universo, ele compõe milhões de substâncias, em cerca de 76 % da massa do universo e 93 % de suas moléculas. No planeta Terra, ele representa aproximadamente 70 % da superfície terrestre. Contudo, ele não é encontrado naturalmente e a sua concentração na atmosfera é muito reduzida, não podendo assim ser considerado um recurso de energia primária, mas sim um vetor energético, necessitando assim ser produzido (ESTÊVÃO, 2008).

Os principais métodos que têm potencial para produzir o hidrogênio são a termólise, eletrólise, reforma a vapor e processos termoquímicos (NEHRIR; WANG, 2016; PALADINO, 2013).

Esta subseção enfocará a tecnologia de produção de hidrogênio baseada na eletrólise da água a partir de energia renovável.

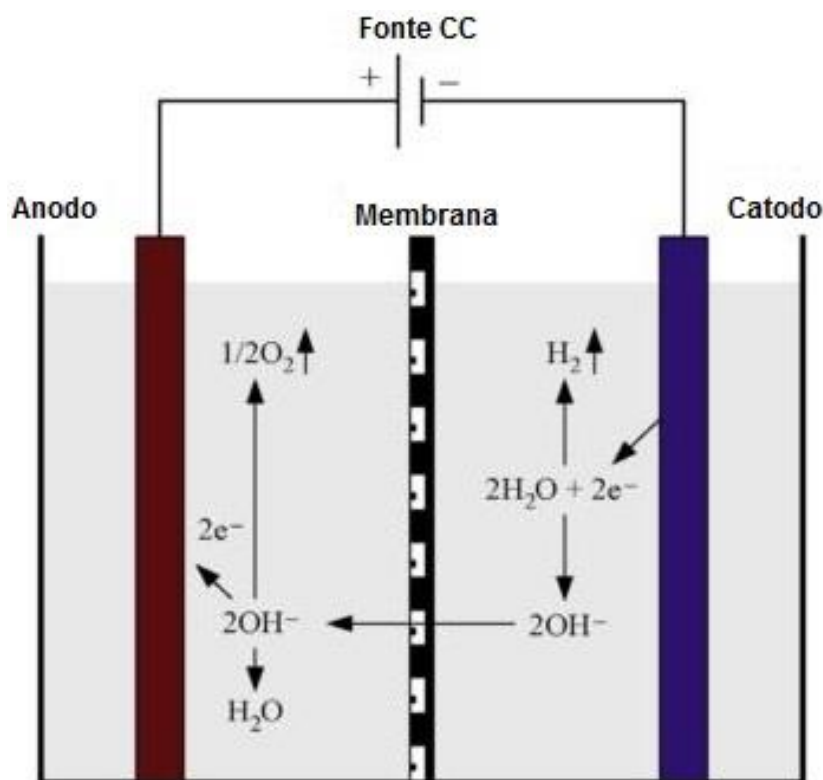
#### 3.1.1 Produção de hidrogênio através da eletrólise da água

A eletrólise é o processo no qual aplica-se uma corrente elétrica diretamente na água, ocasionando a separação de suas moléculas em forma gasosa, como pode ser observado na reação (2) (ARZAMENDI; DIE; GANDI, 2013; BASILE; IULIANELLI, 2014; NEHRIR; WANG, 2016; PALADINO, 2013).



O dispositivo no qual ocorre o processo da eletrólise é chamado de eletrolisador, no qual o processo eletroquímico é basicamente o inverso do que ocorre nas células a combustível, ou seja, um eletrolisador converte energia elétrica em energia química, armazenada em hidrogênio (NEHRIR; WANG, 2016). Os dois tipos mais comuns de eletrolisadores são alcalinos, os quais usam um eletrólito de hidróxido de potássio, e as membranas de troca de prótons (PEM), que usam um eletrólito de membrana de polímero sólido (SINGH et al., 2015). Na Figura 17 é possível observar o esquema de funcionamento de um eletrolisador alcalino.

Figura 17 - Diagrama esquemático de um eletrolisador alcalino

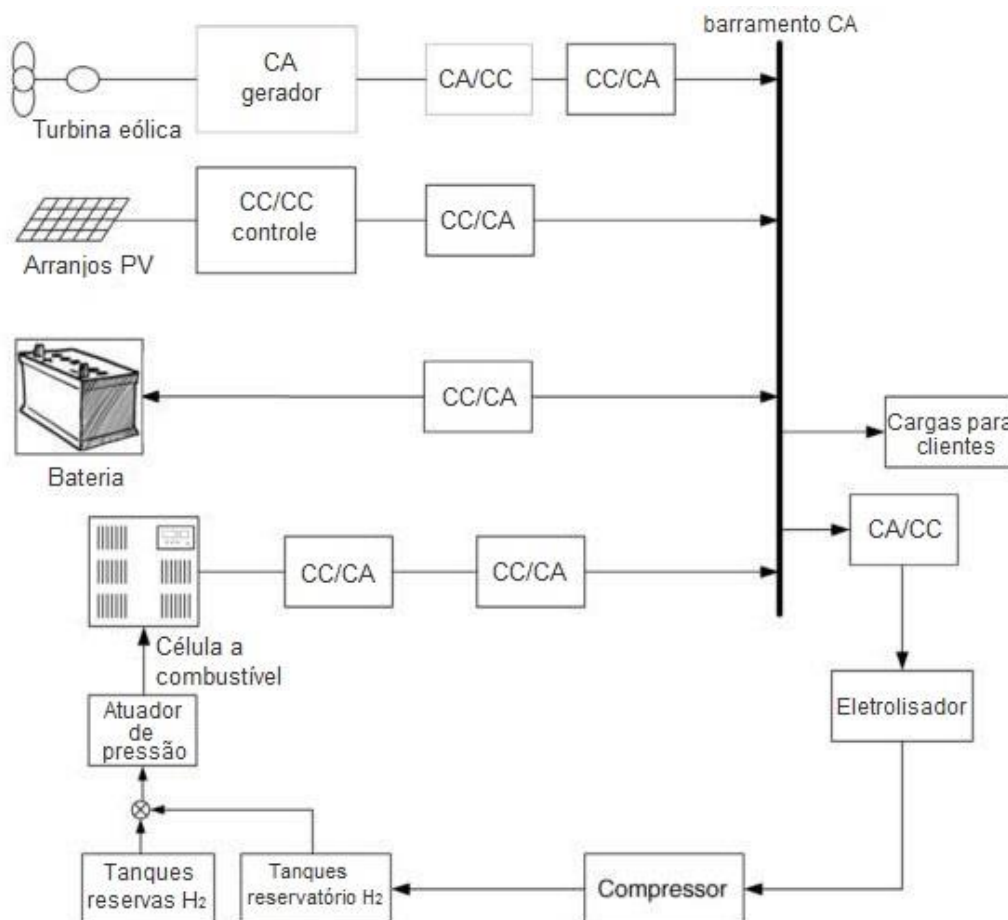


Fonte: Nehrir; Wang (2016).

### 3.1.1.1 Produção de hidrogênio a partir de energia renovável

Os recursos energéticos renováveis, como eólica e solar, são promissores para a produção de hidrogênio. Na Figura 18 é possível observar o esquema de um sistema híbrido independente (vento-solar-eletrolisador/célula de combustível) com os conversores de potência associados. O sistema pode ser projetado de tal forma que a energia gerada pela energia eólica e energia solar forneça eletricidade e qualquer excesso de energia disponível seja usado primeiro para carregar a bateria e depois fornecido ao eletrolisador para gerar hidrogênio que é comprimido e armazenado no reservatório e tanques de reserva, respectivamente. Onde, durante os períodos em que a energia gerada por fontes renováveis não é suficiente para fornecer eletricidade, o hidrogênio pode ser usado para alimentar a célula de combustível para gerá-la (NEHRIR; WANG, 2016).

Figura 18 - Diagrama esquemático de um sistema energético híbrido eólico-solar-híbrido



Fonte: Adaptado de Nehrir; Wang (2016).

As barreiras a serem superadas pelas tecnologias de produção de hidrogênio referem-se às questões da eficiência do processo, que é baixa, e financeira, por ter um alto custo. Considerando uma eficiência de conversão de um sistema híbrido (solar-eólico) em torno de 30 % e a eficiência do eletrolisador em torno de 50 %, resulta em uma eficiência de conversão de eletricidade renovável em hidrogênio em torno de 15 % (NEHRIR; WANG, 2016).

### 3.2 ARMAZENAMENTO E TRANSPORTE DO HIDROGÊNIO

Para que o hidrogênio seja utilizado ele necessita ser armazenado e transportado. Existem várias possibilidades para armazenamento e transporte do hidrogênio. Os principais estados em que o hidrogênio pode ser armazenado e transportado são: estado gasoso, como gás comprimido, estado líquido, como hidrogênio liquefeito e compostos intermediários, como hidreto metálico e sistemas com base de carbono (PALADINO, 2013).

Esta subseção enfocará no armazenamento e transporte do hidrogênio em estado gasoso.

### 3.2.1 Armazenamento e Transporte do Hidrogênio em Estado Gasoso

O hidrogênio em estado gasoso é o mais utilizado para armazenamento, transporte e consumo (PALADINO, 2013). O hidrogênio como gás comprimido pode ser armazenado em tanques de alta pressão com pressões de até 700 bar (70 MPa). Além disso, ele pode ser resfriado criogenicamente a  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$  em tanques isolados dentro de uma faixa de pressão entre 6 e 350 bar (35 MPa). Podendo também ser armazenado em materiais avançados, seja dentro da estrutura ou na superfície do material ou em uma forma de composto químico que irá gerar hidrogênio ao sofrer alguma reação de liberação.

Pelo hidrogênio ter um conteúdo energético muito alto em peso, mas também ter um conteúdo energético muito baixo em volume, isso faz com que se torne um desafio armazenar o hidrogênio, especialmente quando o armazenamento é para transporte, como é o caso para o uso em um veículo (NASH et al., 2012). Contudo, um ponto positivo é que o armazenamento na sua forma gasosa pode ser facilmente realizada nos próprios locais de distribuição (PALADINO, 2013).

O hidrogênio é incolor, inodoro, insípido, não tóxico e não venenoso. Embora não seja corrosivo tem o potencial de afetar a metalurgia de alguns materiais, especialmente quando soldados. Isso pode resultar em fragilização por hidrogênio e levar a pontos fracos em alguns sistemas de armazenamento. Embora o gás natural e o propano também sejam inodoros, os fabricantes industriais incorporam aditivos à base de enxofre para melhorar sua detecção em vazamentos. Atualmente, esses aditivos não são usados com hidrogênio por causa questões de separação e dispersão. Sabe-se que esses aditivos contaminam as células de combustível e outros sistemas de armazenamento e podem comprometer a integridade estrutural (NASH et al., 2012).

O hidrogênio é 50 vezes mais leve que o vapor de gasolina e 14 vezes mais leve que o ar. O impacto disso é que, se for liberado em um ambiente aberto, ele normalmente se elevará e se dispersará rapidamente. Esta é uma vantagem significativa de segurança em um ambiente externo (NASH et al., 2012).

O hidrogênio pode ser armazenado em quatro tipos de tanques de pressão, como apresentado na Figura 19.

Figura 19 - Tipos de tanques para armazenamento de hidrogênio gasoso comprimido



Fonte: Barthelemy; Weber; Barbier (2017).

Os tanques de pressão são geralmente cilindros, podendo ser também polimórficos ou toroidais. Os tanques de pressão metálicos são conhecidos como tipo I. Os tanques de pressão do tipo II consistem em um aro de revestimento metálico grosso envolto na parte cilíndrica com um compósito de resina de fibra. Os tanques de pressão baseados em materiais totalmente compostos, designados por *Composite Overwrapped Pressure Vessel* - COPV, são feitos de um forro plástico ou metálico envolvido por fibras de carbono embutidas em uma matriz de polímero, enrolamento filamentar. Quando o revestimento contribui para a resistência mecânica, acima de 5 %, o COPV é do tipo III, principalmente forro de metal. Caso contrário, o COPV é do tipo IV, principalmente forro de polímero ou raramente forro de metal extremamente fino (BARTHELEMY; WEBER; BARBIER, 2017).

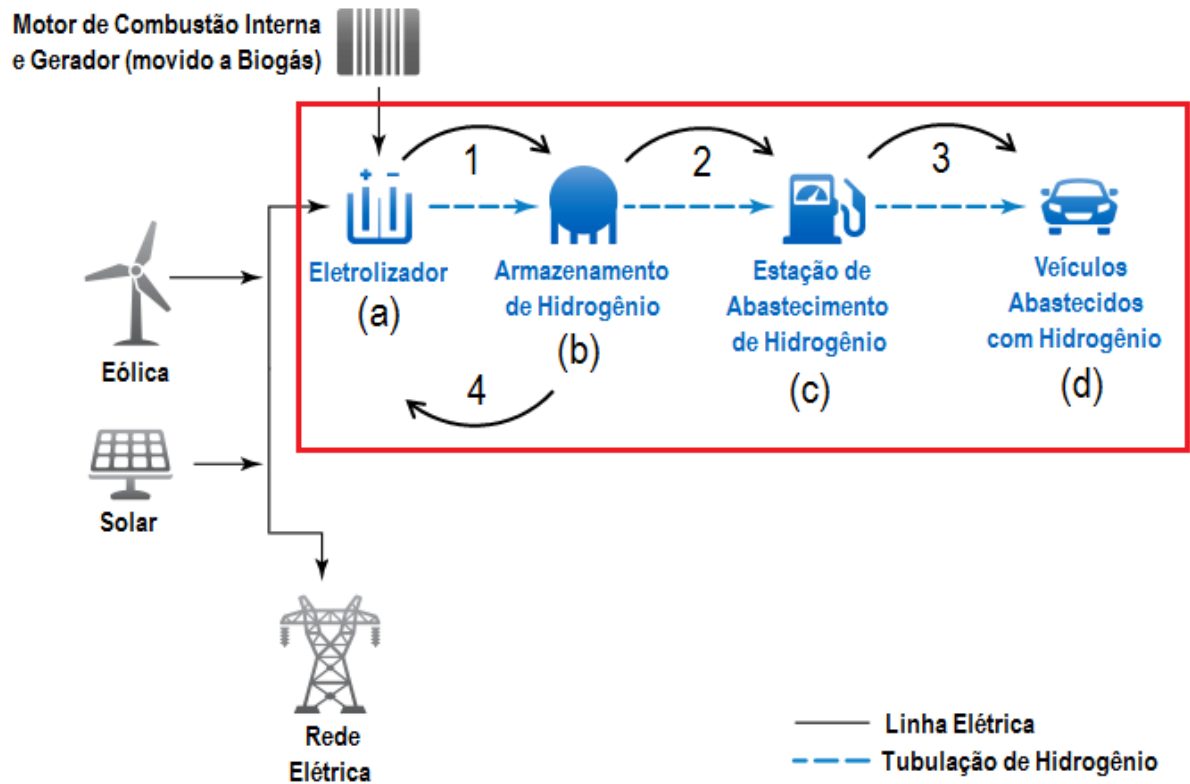
No Brasil, o hidrogênio armazenado em estado gasoso e comprimido é a única forma atualmente homologada para aplicação veicular (FERREIRA, 2007). Mas o país ainda carece de normas e licenças para produção, transporte e uso de hidrogênio, sendo em alguns momentos utilizadas normas e licenças pré-estabelecidas para o gás natural veicular (GNV), pela similaridade entre eles (NEVES; PINTO, 2013).

### 3.3 USO DINÂMICO DO HIDROGÊNIO: PRODUÇÃO, ARMAZENAMENTO, ABASTECIMENTO E CONSUMO

O uso dinâmico constitui-se no monitoramento constante do nível de hidrogênio armazenado a fim de saber quando o volume mínimo for atingido para que seja acionada a produção do mesmo, e o processo de armazenamento, para que não falta hidrogênio segundo o consumo estipulado do sistema híbrido. Observa-se na Figura 20 que entre os processos 1-2-3 caracterizam o ciclo de produção-consumo do hidrogênio, já os processos 1-2-4

constituem o ciclo de uso dinâmico do hidrogênio; sendo o processo 4 um monitoramento constante para identificação do volume mínimo de hidrogênio nos tanques e assim acionar a produção de hidrogênio. A energia elétrica gerada que não está sendo consumida para produção de hidrogênio alimenta a rede secundariamente até o momento em que o sistema for acionado e a energia elétrica for requerida para que ele seja produzido.

Figura 20 - Estágios do hidrogênio: (a) produção, (b) armazenamento, (c) abastecimento e (d) consumo



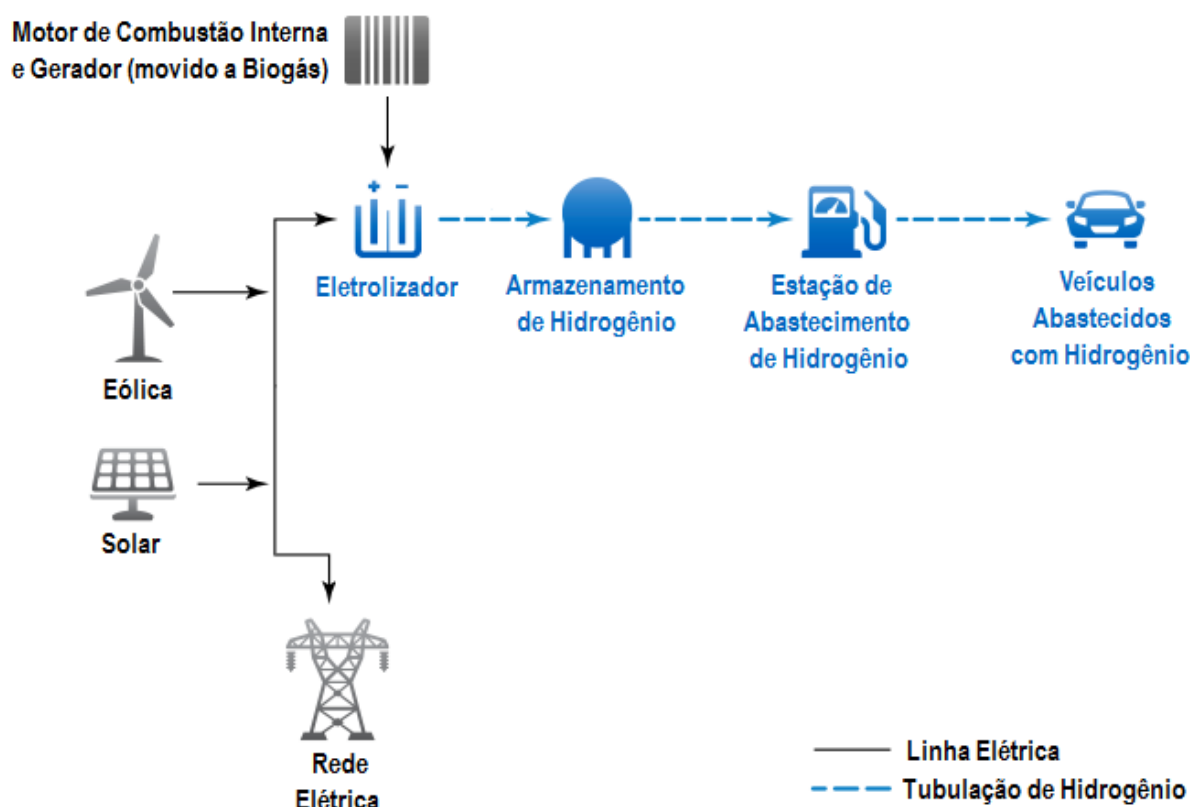
Fonte: Adaptado de National Renewable Energy Laboratory (2014).

## 4 ASPECTOS ENERGÉTICOS

### 4.1 ESQUEMATIZAÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO DE GERAÇÃO

O sistema proposto para ser estudado (Figura 21) constitui-se do uso de fontes alternativas e renováveis de energia (solar-eólica-biogás) para geração de energia elétrica a fim de produzir hidrogênio a partir de eletrólise da água, sendo ele armazenado em seu estado gasoso e posteriormente redirecionado a uma estação de abastecimento para ser utilizado como combustível veicular em veículos.

Figura 21 - Esquema simplificado do sistema híbrido de geração



Fonte: Adaptado de National Renewable Energy Laboratory (2014).

A análise energética será desenvolvida para que seja dimensionado o sistema híbrido de geração de energia proposto, com base nos consumos de hidrogênio e a eletricidade requerida para sua produção. A metodologia aplicada consistiu em primeiramente escolher um modelo de ônibus elétrico movido a hidrogênio, posteriormente levantar o consumo de hidrogênio diário do ônibus (45 kg), considerando um estoque para até quatro dias (180 kg) sem

produção de hidrogênio, devido à intermitência de duas das três fontes utilizadas, e, também, a eletricidade requerida diariamente (2650 kWh) para produção e para compressão H<sub>2</sub>, devido ao uso do eletrolisador no processo de eletrólise da água e o compressor, respectivamente. Assim que foram obtidos os consumos de hidrogênio e de eletricidade, continuou-se a obter os dados dos recursos solar, eólico e biogás (produção oriunda de aterro sanitário) para a cidade de São Paulo. A planta híbrida proposta foi concebida levando em consideração a intermitência das fontes utilizadas para sua distribuição na participação do fornecimento de eletricidade, sendo as fontes solar e eólica com maior intermitência e devido a isso, com menor participação. O cenário adotado, então, foi: 20 % de energia solar fotovoltaica, 25 % de energia eólica e 55 % de eletricidade gerada a partir do uso de biogás para entrega da eletricidade necessária para satisfazer a demanda de hidrogênio de acordo com o consumo do ônibus movido a célula a combustível H<sub>2</sub> que hoje circula experimentalmente na cidade de São Paulo.

#### 4.2 CARACTERÍSTICAS E CONSUMO DO ÔNIBUS HÍBRIDO MOVIDO A HIDROGÊNIO

O ônibus híbrido movido a hidrogênio é um veículo de 12,6 m de piso baixo com capacidade para 90 passageiros. É alimentado por duas células a combustível de 68 kW, baterias e um motor elétrico de 210 kW. Nove cilindros compósitos (alumínio reforçado com fibra de carbono) armazenam até 45 kg de hidrogênio no barramento a uma pressão de 350 bar (35 MPa). Esta quantidade de combustível fornece autonomia para 300 km (15 kg de H<sub>2</sub>/100 km), mais do que suficiente para uma operação de dia inteiro (BRAGA, 2010; NEVES; PINTO, 2013). A rota percorrida é a do Corredor Metropolitano ABD (São Mateus - Jabaquara) que contém 33 km de extensão (Figura 22) (EMPRESA METROPOLITANA DE TRANSPORTES URBANOS DE SÃO PAULO, 2017a). Para fins de dimensionamento do sistema híbrido, será considerado que o ônibus percorrerá diariamente 264 km, o equivalente a percorrer 8 vezes o Corredor Metropolitano ABD.

Figura 22 - Mapa do traçado do Corredor Metropolitano ABD (São Mateus - Jabaquara)



Fonte: Adaptado de Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo (2017b).

#### 4.3 CARACTERÍSTICAS E CONSUMO DO ELETROLISADOR

Para seleção do eletrolisador foi considerada a necessidade mínima de hidrogênio (45kg ou 500 Nm<sup>3</sup>) por dia dentro do tempo (considerando 5 horas de operação, no pior cenário (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2005)) em que o sistema estará operando para esse fim. Com base nessas informações optou-se pelo modelo de eletrolisador HySTAT®-100-10, cujas características são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados do eletrolisador HySTAT®-100-10 da Hydrogenics

Dados	Valor
Fluxo de hidrogênio nominal	100 Nm <sup>3</sup> /h
Pressão de saída	27 barg (~2,7 MPa)
Consumo de energia (utilidades incluídas, na capacidade nominal)	5,0 kWh/Nm <sup>3</sup>
Consumo de água da torneira	1,7 L/Nm <sup>3</sup> .H <sub>2</sub>

Fonte: Adaptado de Hydrogenics (2018).

De acordo com Braga (2014), a eficiência energética do eletrolisador pode ser determinada pela equação (1):

$$\eta_{\text{eletrolisador}} = \frac{\dot{m}_{H_2} \cdot PCI_{H_2}}{E_{req}} \quad (1)$$

Sendo,  $E_{req}$  a potência consumida pelo eletrolisador em [kW],  $\dot{m}_{H_2}$  o fluxo mássico de hidrogênio produzido em [kg/s],  $PCI_{H_2}$  o poder calorífico inferior do hidrogênio em [kJ/kg] e  $\eta_{eletrolisador}$  a eficiência do eletrolisador [-].

O poder calorífico inferior do hidrogênio é 120.000 kJ/kg (PALADINO, 2013).

#### 4.4 PROCESSO DE ELETRÓLISE

Para o processo de eletrólise foram considerados painéis solares fotovoltaicos, aerogeradores e motor de combustão interna a biogás gerando eletricidade para ser utilizada no eletrolisador a fim de produzir hidrogênio.

A eficiência energética do processo de eletrólise utilizando eletricidade gerada pelos painéis solares fotovoltaicos, pelos aerogeradores e pela queima de biogás no motor de combustão interna, sendo que cada uma das fontes é responsável por uma parcela da energia elétrica gerada, respectivamente, 20 %, 25 % e 55 %. A eficiência total do sistema híbrido é calculada a partir da equação (2), adaptada de Braga (2014) e Paulino (2017).

$$\eta_{eletro.el.SH} = [0,20 \cdot (\eta_{el.solar}) + 0,25 \cdot (\eta_{el.eolico}) + 0,55 \cdot (\eta_{el.MCI})] \cdot \eta_{eletrolisador} \quad (2)$$

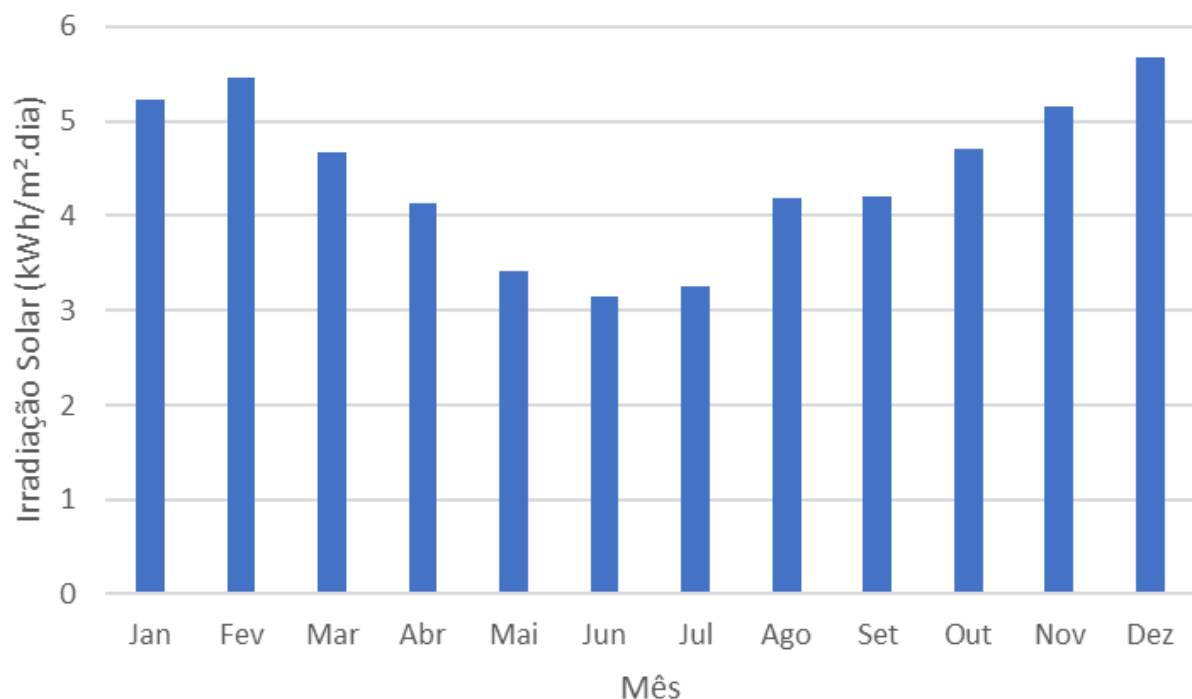
Sendo,  $\eta_{eletro.el.SH}$  é a eficiência energética do processo de eletrólise pelo sistema híbrido solar-eólico-biogás [-], respectivamente,  $\eta_{eletrolisador}$  é eficiência do eletrolisador [-] e  $\eta_{el.solar}$ ,  $\eta_{el.eolico}$  e  $\eta_{el.MCI}$  são as eficiências da geração de eletricidade dos painéis solares fotovoltaicos, dos aerogeradores e do motor de combustão interna a biogás [-], respectivamente.

A eficiência média de painéis fotovoltaicos é baixa, em torno de 14 %, tem-se que a eficiência do processo de produção de hidrogênio com energia proveniente desse tipo de sistema é de 11,8 %. Já a eficiência de aerogeradores comerciais gira em torno de 35 % para sistemas de grande porte. Dessa forma, considerando-se a eficiência de usinas (ou fazendas) eólicas em torno de 35 %, tem-se que a eficiência do processo de produção de hidrogênio com energia proveniente desse tipo de sistema é de 29,5 % (BRAGA, 2014).

#### 4.5 RECURSO SOLAR NA CIDADE DE SÃO PAULO

De acordo com a base de dados da Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (2019a), a irradiação solar média anual na cidade de São Paulo é de 4,43 kWh/m<sup>2</sup> no plano com ângulo igual à latitude. O mês que tem maior irradiação solar média é dezembro com 5,67 kWh/m<sup>2</sup>. A Figura 23 apresenta a irradiação solar média mensal na cidade de São Paulo, no estado de São Paulo.

Figura 23 - Irradiação Solar na cidade de São Paulo



Fonte: Adaptado de Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (2019a).

Um outro fator a ser considerado ao se trabalhar com um sistema que envolva painéis fotovoltaicos são as “horas de sol”, que são aquelas horas que têm irradiação solar significativa, ao redor de 1.000 W/m<sup>2</sup> para que os painéis gerem quantidade suficiente de eletricidade. Normalmente, são usadas cinco ou seis horas de sol por dia para os cálculos. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (2005), na cidade de São Paulo tem-se até seis horas de radiação solar. Para este estudo, foram consideradas cinco horas de sol, como pior cenário, para a realização dos cálculos para essa cidade.

#### 4.6 POTÊNCIA ELÉTRICA EM PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA

Segundo Laranci, Silveira e Lamas (2012), a energia gerada por uma série de painéis fotovoltaicos é diretamente proporcional à radiação solar, conforme a equação (3).

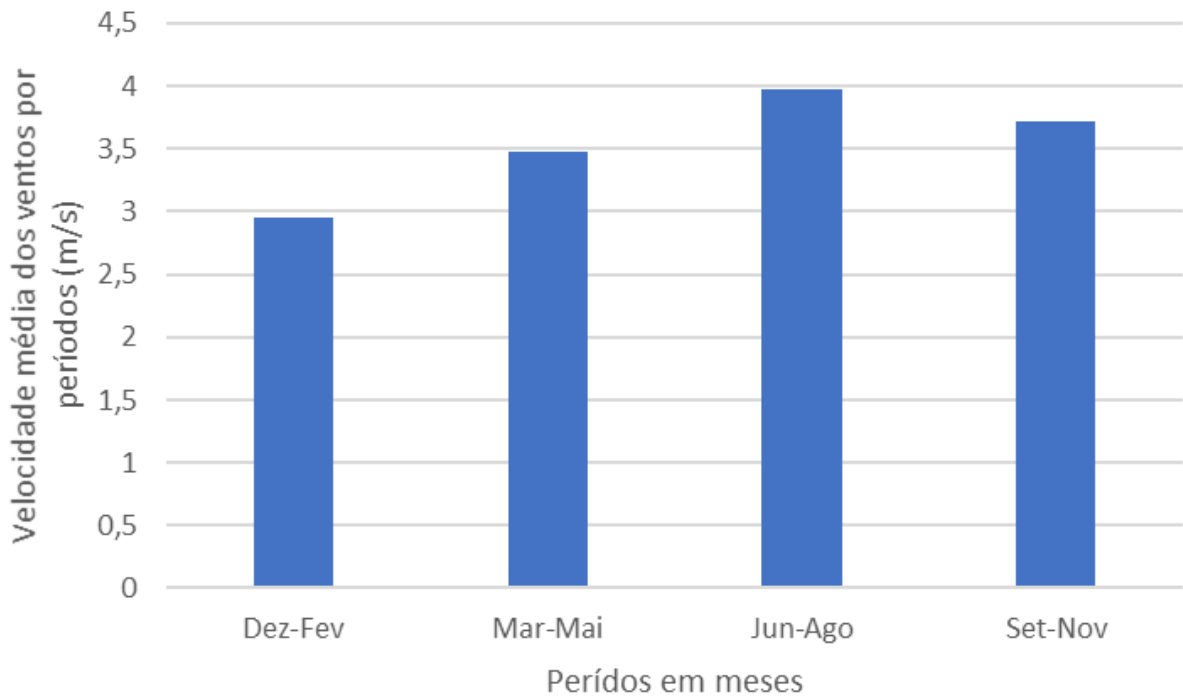
$$E_p = R_A \cdot A_p \cdot \frac{\eta_{pv}}{100} \quad (3)$$

Sendo,  $\eta_{pv}$  a eficiência do painel fotovoltaico [%],  $A_p$  a área de um painel fotovoltaico [m<sup>2</sup>],  $R_A$  a insolação diária média mensal [kWh/m<sup>2</sup>.dia]. A eficiência do painel fotovoltaico depende do tipo e da pureza do material semicondutor utilizado.

#### 4.7 RECURSO EÓLICO NA CIDADE DE SÃO PAULO

De acordo com a base de dados da Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (2019b), observa-se que a velocidade média anual do vento para uma altura de 50 m é de 3,53 m/s e tem uma velocidade média máxima de 3,98 m/s entre os meses de junho e agosto. A Figura 24 apresenta os valores das velocidades médias dos ventos por períodos para uma altura de 50 metros.

Figura 24 - Velocidade média dos ventos por períodos, em meses, da cidade de São Paulo para uma altura 50 m



Fonte: Adaptado de Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (2019b).

#### 4.8 POTÊNCIA ELÉTRICA EM PLANTA EÓLICA

Existe uma relação intrínseca entre a geração de eletricidade por uma turbina eólica e a velocidade do vento que passa por suas pás. Segundo Ruiz (2016) pode-se calcular a potência elétrica gerada por uma turbina eólica, a qual é diretamente proporcional à velocidade do vento ao cubo, pela seguinte equação:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_{tr} \cdot V^3 \cdot C_{p_r} \quad (4)$$

Sendo,  $\rho$  a massa específica do ar [ $\text{kg/m}^3$ ],  $A_{tr}$  a área transversal do rotor [ $\text{m}^2$ ],  $V$  a velocidade do vento [ $\text{m/s}$ ], e  $C_{p_r}$  o coeficiente da potência do rotor, segundo Roberts (2012) o valor é de 0,59. A massa específica do ar utilizada foi de  $1,1839 \text{ kg/m}^3$  para temperatura média de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### 4.9 DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DE WEIBULL E RAYLEIGH

Conhecer a frequência das velocidades dos ventos é necessário para se ter uma melhor estimativa da energia elétrica que possivelmente pode gerada. As distribuições de frequência desenvolvidas por Weibull e Rayleigh são consideradas as mais compatíveis com as velocidades de vento reais. Segundo Ruiz (2016), ao modificar a função de distribuição de Weibull com parâmetros da função de distribuição de Rayleigh, obtém-se a equação (5).

$$f(V) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{V}{\bar{V}^2} \cdot \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \cdot \left( \frac{V}{\bar{V}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

Sendo,  $V$  a velocidade do vento [m/s] e  $\bar{V}$  a velocidade média do vento [m/s].

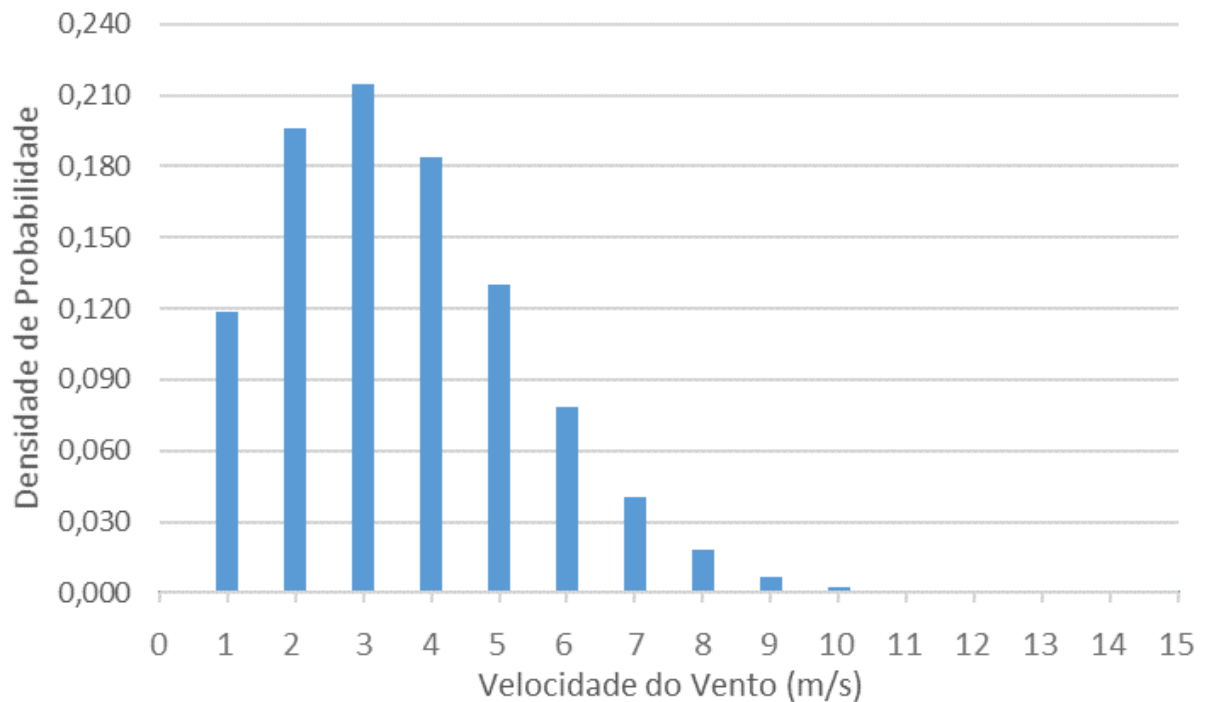
Ao se ter conhecimento da distribuição de frequência de ventos, pode-se identificar quantas horas de vento um local terá para serem aproveitadas por um sistema eólico.

##### 4.9.1 Distribuição de Frequência de Ventos na Cidade de São Paulo

Aplicando a equação (5), obteve-se a Figura 24, a qual apresenta a distribuição de frequência Rayleigh das velocidades dos ventos na cidade de São Paulo. A maior frequência foi a de 21,4 % na velocidade do vento de 3 m/s.

Observou-se na Figura 25 que com a distribuição de frequência de Rayleigh, pode-se determinar as horas diárias e as anuais em que os ventos podem gerar eletricidade com o aerogerador selecionado, que são quando os ventos têm velocidade maior ou igual que a velocidade de partida. Encontrou-se que as velocidades superiores a 1,5 m/s têm uma probabilidade de 87,1 %; isso significa que na cidade de São Paulo tem-se aproximadamente 21 horas/dia e 7.630 horas/ano de ventos com velocidades que podem fazer girar as turbinas eólicas. Essa quantidade de horas vai ser utilizada como sendo as horas de operação para o subsistema eólico.

Figura 25 - Densidade de probabilidade de Rayleigh para cidade de São Paulo



Fonte: Elaboração própria

#### 4.10 RECURSO DE BIOGÁS NA CIDADE DE SÃO PAULO

Atualmente a cidade de São Paulo utiliza três aterros para dispor os resíduos sólidos urbanos. Para este estudo foi considerada a produção de biogás do aterro sanitário privado Centro de Disposição de Resíduos (CDR) Pedreira. A produção de biogás do aterro é de 15.000 Nm<sup>3</sup>/h (PAULINO, 2017).

Segundo Paulino (2017), a composição do de biogás de aterros sanitários é 55 % de CH<sub>4</sub> e 45 % de CO<sub>2</sub>, sendo seu do poder calorífico inferior de 15429 kJ/kg e a massa molar de 52,08 kmol/kg.

#### 4.11 MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA A BIOGÁS

A eficiência de geração de eletricidade de catálogo do fabricante (42,50 %) tem um valor elevado quando comparado com a literatura, sendo assim, será adotado para o estudo um valor de eficiência de geração de eletricidade de 28,45 % (PAULINO, 2017). A partir da equação (6) pode-se determinar a quantidade de biogás necessária para gerar a potência indicada no motor de combustão interna.

$$\dot{m}_{biogas.MCI} = \frac{E_{pMCI}}{\eta_{el.MCI} \cdot PCI_{biogas}} \quad (6)$$

Sendo,  $\dot{m}_{biogas.MCI}$  o fluxo mássico de biogás no motor de combustão interna [kg/s],  $E_{pMCI}$  a potência elétrica produzida no motor-gerador [kW]<sup>1</sup>,  $\eta_{el.MCI}$  a eficiência de geração de eletricidade do motor de combustão interna [-] e  $PCI_{biogas}$  o poder calorífico inferior do biogás [kJ/kg].

#### 4.12 COMPRESSOR DE HIDROGÊNIO

De acordo com Araújo (2016), a eficiência energética do armazenamento do hidrogênio pode ser dada pela equação (7). Sabendo-se que a sua eficiência energética do processo de compressão superior a 90 %.

$$\eta_{armz} = \frac{E_{armz}}{E_{req}} \quad (7)$$

Sendo,  $\eta_{armz}$  a eficiência do armazenamento [-],  $E_{armz}$  a potência armazenada [kW] e  $E_{req}$  a potência requerida no processo [kW].

#### 4.13 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA HÍBRIDO

Para o dimensionamento do sistema híbrido solar-eólico-biogás tomou-se a demanda de energia elétrica diária máxima necessária, correspondente a 2.650 kWh, para a produção e compressão do hidrogênio, com base no consumo do eletrolisador, compressor e nas horas de operação do sistema, já especificadas anteriormente. Apoiando-se nas resoluções de ANEEL nº 482 do ano 2012 e nº 687 do ano 2015, as quais possibilitam a implementação de geração distribuída e a venda de excedente de energia para a empresa distribuidora por parte dos consumidores finais.

---

<sup>1</sup> 1 kW = 1 kJ/s

Calculou-se a eletricidade gerada por eles por mês a fim de obter a média mensal de eletricidade gerada. Foram simulados diferentes arranjos com painéis fotovoltaicos, aerogeradores e motores de combustão interna para que a média mensal de energia elétrica gerada fosse dividida em 20 %, 25 % e 55 %, respectivamente. Os percentuais relacionados aos painéis fotovoltaicos e aos aerogeradores foram menores em relação ao do motor de combustão interna devido à intermitência de suas fontes.

Realizou-se o balanço energético mensal (Tabela 8) aplicando as equações (3), (4), (5) e (6) para identificar em que meses se ganham créditos de energia e em que meses é necessário comprar eletricidade da concessionária, em razão dos recursos renováveis não serem constantes ao longo do tempo. O balanço energético mensal foi calculado com base na energia elétrica gerada pelo sistema híbrido solar-eólico-biogás menos o consumo de eletricidade mensal requerido.

Quando o balanço é negativo, a diferença de quilowatts hora é comprada da distribuidora para garantir o fornecimento de energia, sendo o balanço energético igual a zero, significa que o sistema híbrido está gerando a quantidade exata de eletricidade requerida, mas no caso de o valor do balanço ser positivo, obtém-se créditos de energia pelo sistema de compensação de energia elétrica, os quais podem ser usados nos sessenta meses seguintes.

Com base nos recursos eólicos, solares e disponibilidade de biogás, foram levados em conta, para a seleção dos equipamentos, os parâmetros da velocidade de partida e a área transversal do aerogerador, a eficiência de conversão dos módulos solares, a potência elétrica entregue pelo conjunto motor de combustão interna-gerador, o preço e a disponibilidade no mercado.

Foi escolhida a turbina eólica de eixo vertical, pois tem um melhor desempenho em áreas urbanas (RUIZ, 2016), modelo Aeolos-V 5kW da empresa Aeolos com uma potência nominal de 5 kW, para o módulo fotovoltaico escolheu-se o modelo CS6X-315 da empresa Canadian Solar com uma potência máxima de 315 Wp, para o motor de combustão interna foi selecionado o modelo SCANIA OC 13A (380 kVA / 300 kW) da ER-BR e para o compressor de hidrogênio escolheu-se o modelo C06-40-300/600LX-H2 da Hydro-PAC. As Tabelas 3, 4 e 5 mostram as principais características do painel solar fotovoltaico da Canadian Solar, do aerogerador da Aeolos e do motor de combustão interna da ER-BR.

Tabela 3 - Especificações do módulo Canadian Solar CS6X-315

<b>Especificações Técnicas</b>	
Tipo de célula	Policristalino
Potência elétrica nominal	315 W
Tensão ótima de operação	36,60 V
Corrente ótima de operação	8,61 A
Tensão de circuito aberto	45,1 V
Corrente de curto circuito	9,18 A
Eficiência	16,42 %
Área do módulo	1,92 m <sup>2</sup>
Vida útil	25 anos

Fonte: Adaptado de Canadian Solar (2016).

Tabela 4 - Especificações da turbina eólica Aeolos 5 kW

<b>Especificações Técnicas</b>	
Tipo de aerogerador	VAWT
Potência elétrica nominal	5,00 kW
Altura do rotor	4,80 m
Largura do rotor	4,50 m
Área transversal	7,07 m <sup>2</sup>
Velocidade de arranque	1,50 m/s
Velocidade de vento nominal	10,00 m/s
Tipo de gerador elétrico	Gerador Magnético Permanente
Tipo de freio	Mecânico Manual/Auto
Vida útil	20 Anos

Fonte: Adaptado de Aeolos (2012).

Tabela 5 - Especificações do motor de combustão interna a biogás ER-BR OC13 6C/24V

<b>Especificações Técnicas</b>	
Potência Elétrica	300 kW
Eficiência Elétrica	42,50 % <sup>2</sup>
Consumo de Biogás (75 % de CH <sub>4</sub> )	100 m <sup>3</sup> /h

Fonte: Adaptado de ER-BR - Energias Renováveis (2018).

<sup>2</sup> Valor da eficiência elétrica de catálogo do motor não foi utilizada para os cálculos.

Tabela 6 - Especificações do compressor de hidrogênio C06-40-300/600LX

<b>Especificações Técnicas</b>	
Pressão de Entrada	2,00 a 4,00 MPa
Pressão de Descarga	40,00 MPa
Capacidade Máxima de H <sub>2</sub> (entrada)	129 Nm <sup>3</sup> /h
Potência Requerida	30 kW

Fonte: Adaptado de Hydro-Pac (2011).

#### 4.14 RESULTADOS DA ANÁLISE ENERGÉTICA

A Tabela 7 apresenta as quantidades de equipamentos necessários para a demanda requerida diariamente (2650 kWh) para produção e compressão do hidrogênio, as quais foram calculadas aplicando as equações (3) e (4) que forneceram a energia gerada em 1 painel solar fotovoltaico e em 1 aerogerador, segundo os modelos adotados e disponibilidade dos recursos naturais para a região. Posteriormente, com os cenários pré-estabelecidos (20/25/55), foi calculado quanto cada sistema deveria fornecer de forma isolada e uma vez sabendo quanto de energia elétrica produzia cada unidade de painel solar fotovoltaico e aerogerador, chegou-se aos valores totais de cada sistema; o sistema do MCI foi escolhido para atender com apenas 1 unidade da sua demanda, sendo necessário apenas a adequação do fluxo mássico de biogás aplicando a equação (6), uma vez que a eficiência elétrica de catálogo não foi utilizada, visto que na prática essa eficiência é menor. Área necessária agrupar o sistema híbrido de forma total deveria ter aproximadamente 1.755 m<sup>2</sup>, sendo 745 m<sup>2</sup> para o sistema solar fotovoltaico, 1.000 m<sup>2</sup> para sistema eólico e 10 m<sup>2</sup> sistema do MCI.

Tabela 7 - Número de equipamentos que compõe o sistema híbrido

<b>Quantidade de Painéis Fotovoltaicos</b>	<b>Quantidade de Aerogeradores</b>	<b>Quantidade de Motores de Combustão Interna</b>	<b>Potência Instalada (kW)</b>
387	136	1	1.101,905

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 8 contém a eletricidade mensal gerada pelo o sistema solar fotovoltaico ( $\dot{E}_{GSF}$ ) aplicando a equação (3) pela quantidade de dias do mês, pelo o sistema eólico ( $\dot{E}_{GE}$ ) aplicando a equações (4) e (5) pela quantidade de dias do mês, pelo sistema com o motor de combustão interna ( $\dot{E}_{GMCI}$ ) aplicando a equação (6), para adequação do fluxo mássico de

biogás para atingir a produção eletricidade de catálogo, pela quantidade de dias do mês e o balanço energético. Para o balanço energético, utilizou-se o total gerado pelo sistema híbrido solar-eólico-biogás ( $\dot{E}_{GSH}$ ) subtraído do total de eletricidade requerida ( $\dot{E}_{Req}$ ) que é a quantidade diária (2650 kWh) pela quantidade de dias do mês. Quando o balanço é positivo, significa que há excedente e ele deve ser vendido à concessionária, o qual se observa na última coluna com a palavra “Venda”. No caso contrário, se o balanço energético é negativo, deve haver a compra de eletricidade da concessionária, explicado na última coluna com a palavra “Compra”.

Observa-se na Figura 26 a geração mensal de eletricidade pelo sistema solar fotovoltaico ( $\dot{E}_{GSF}$ ), pelo o sistema eólico ( $\dot{E}_{GE}$ ) e pelo o sistema com o motor de combustão interna ( $\dot{E}_{GMCI}$ ); sendo possível constatar a intermitência ao longo dos meses dos sistemas solar fotovoltaico e eólico, reforçando a justificativa do cenário adotado. O motor de combustão interna apresenta pequenas oscilações na geração de eletricidade devido ao estoque de hidrogênio, que ao atingir sua capacidade máxima interrompe a produção eletricidade, como pode ser observado nas Figuras 28 e 29.

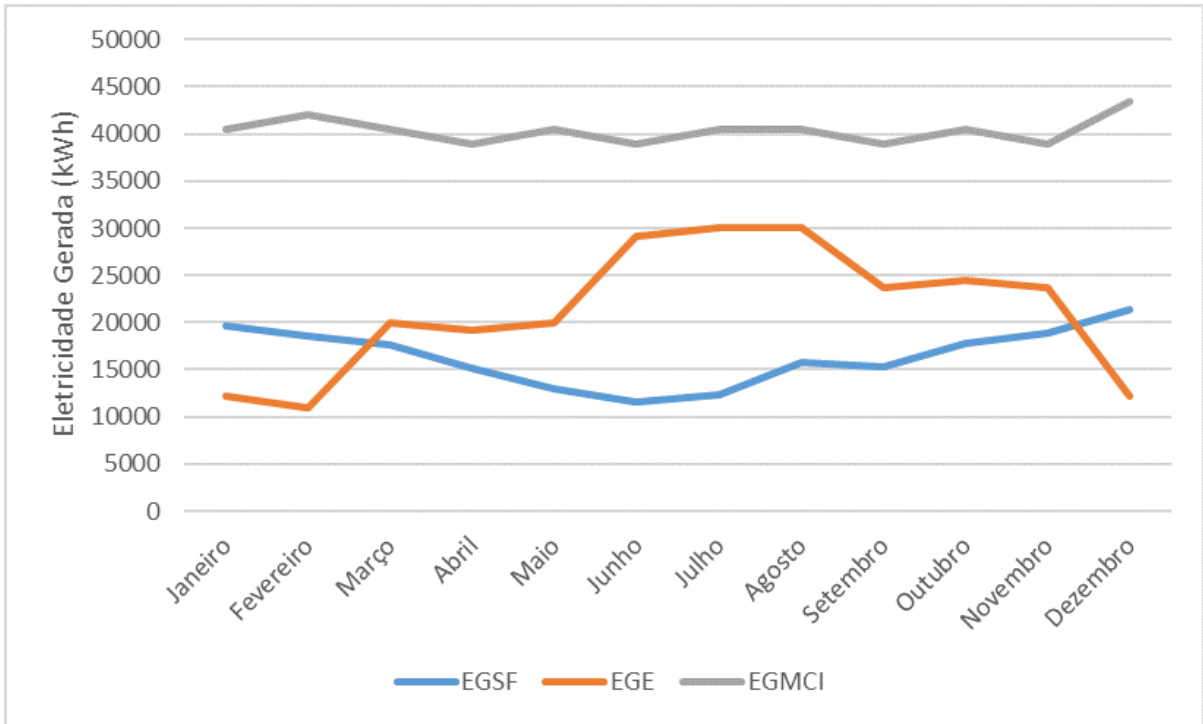
Observa-se na Figura 27 a geração mensal de eletricidade pelo sistema híbrido solar-eólico-biogás ( $\dot{E}_{GSH}$ ) em relação ao total de eletricidade requerida ( $\dot{E}_{Req}$ ) para produção e compressão do hidrogênio, constatando que, com exceção do mês de fevereiro, há excedente.

Tabela 8 - Balanço energético do sistema híbrido solar-eólico-biogás

Mês	$\dot{E}_{GSF}$ (kWh)	$\dot{E}_{GE}$ (kWh)	$\dot{E}_{GMCI}$ (kWh)	$\dot{E}_{GSH}$ (kWh)	$\dot{E}_{Req}$ (kWh)	Balanço Energético (kWh)	Compra/Venda
Janeiro	19.731	12.206	40.500	72.437	71.550	887	Venda
Fevereiro	18.641	11.025	42.000	71.666	74.200	-2.534	Compra
Março	17.690	19.902	40.500	78.092	71.550	6.542	Venda
Abril	15.107	19.260	39.000	73.367	68.900	4.467	Venda
Mai	12.927	19.902	40.500	73.329	71.550	1.779	Venda
Junho	11.523	29.066	39.000	79.589	68.900	10.689	Venda
Julho	12.323	30.035	40.500	82.858	71.550	11.308	Venda
Agosto	15.800	30.035	40.500	86.335	71.550	14.785	Venda
Setembro	15.364	23.737	39.000	78.100	68.900	9.200	Venda
Outubro	17.766	24.528	40.500	82.794	71.550	11.244	Venda
Novembro	18.875	23.737	39.000	81.612	68.900	12.712	Venda
Dezembro	21.432	12.206	43.500	77.138	76.850	288	Venda

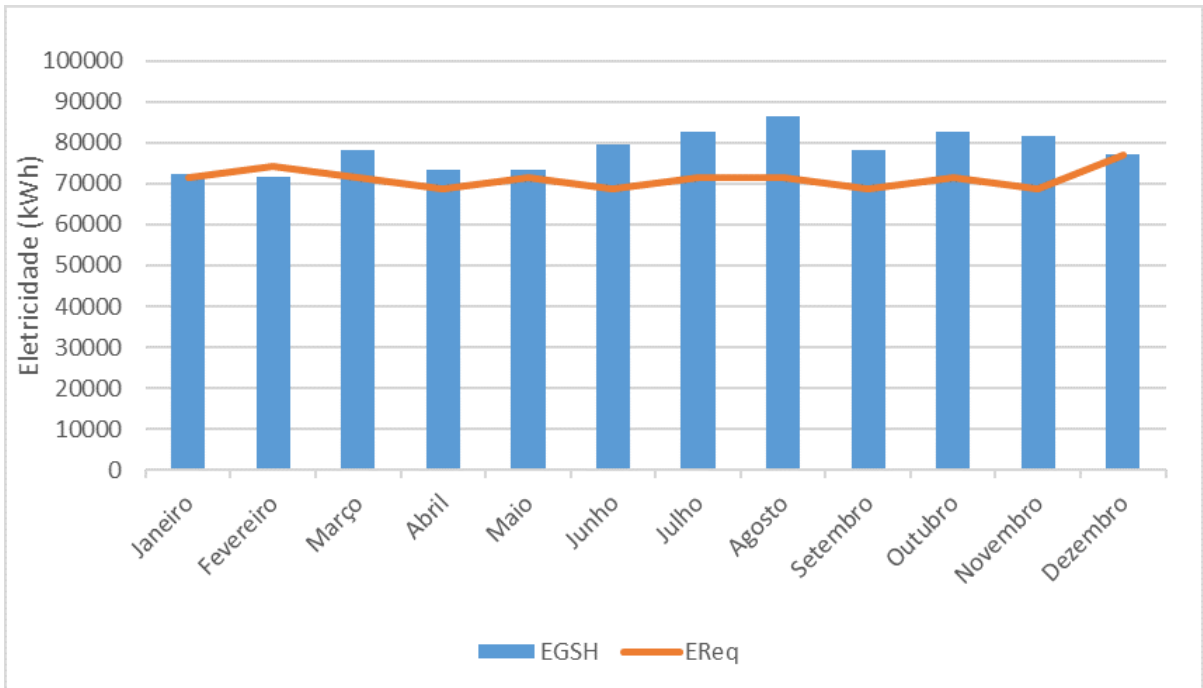
Fonte: Elaboração própria

Figura 26 - Eletricidade gerada pelos painéis solares fotovoltaicos ( $\dot{E}_{GSF}$ ), pelos aerogeradores ( $\dot{E}_{GE}$ ) e pelo conjunto motor de combustão interna-gerador ( $\dot{E}_{GMCI}$ )



Fonte: Elaboração própria

Figura 27 - Eletricidade gerada pela planta híbrida ( $\dot{E}_{GSH}$ ) vs. eletricidade requerida ( $\dot{E}_{Req}$ )



Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 9 é apresentado o resultado do ajuste no fluxo mássico de biogás requerido no motor de combustão interna (MCI), visto que o percentual de metano do biogás utilizado é diferente do indicado em catálogo e que a eficiência do MCI considerada também é. Ainda são explicitados os resultados de eficiência do eletrolisador e do processo de eletrólise.

Na Tabela 10 são exibidos os resultados referentes ao processo de compressão do hidrogênio.

Tabela 9 - Resultados energéticos dos processos envolvidos na eletrólise da água

	<b>Dados</b>
Fluxo mássico ajustado de biogás no motor de combustão interna	343,66 Nm <sup>3</sup> /h
Eficiência do eletrolisador	59,93 %
Eficiência energética do processo de eletrólise	15,21 %

Fonte: Elaboração própria

Tabela 10 - Resultados energéticos do processo de compressão do hidrogênio

	<b>Dados</b>
Pressão de Armazenamento	40 Mpa
Potência Elétrica Consumida	30 kW
Eficiência Energética do Armazenamento	94,4 %

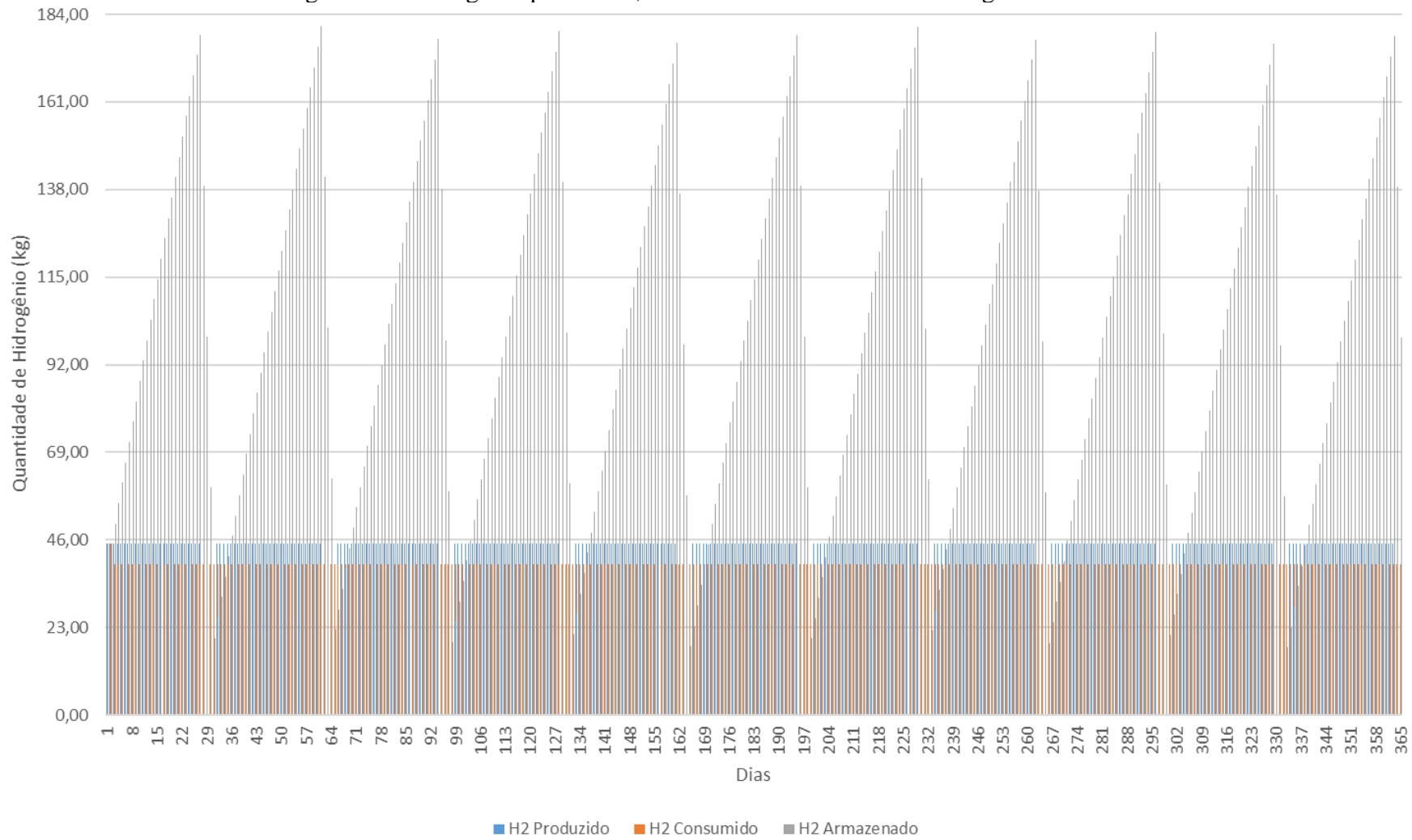
Fonte: Elaboração própria

#### **4.14.1 Resultados do Uso Dinâmico do Hidrogênio: Produção, Armazenamento, Abastecimento e Consumo**

Pode-se observar de forma global na Figura 28 a produção, o consumo e o monitoramento constante do nível de hidrogênio armazenado a fim de saber quando o volume mínimo for atingido para que seja acionada a sua produção novamente, bem como o processo de armazenamento, para que não falte hidrogênio, segundo o consumo estipulado; esquema visto anteriormente na Figura 20. Na Figura 29 observa-se de forma detalhada os primeiros 31 dias, referentes ao mês de janeiro, nos quais constata-se que os primeiros 27 dias ocorreram produção, consumo e armazenamento, quando foi alcançada sua capacidade máxima estocagem, de hidrogênio, a partir do 28º até o 31º dia não ocorreu nem a produção e nem o armazenamento de hidrogênio, apenas o consumo, provindo do estoque. No 32º dia a produção e o armazenamento são retomados, dando início a um novo ciclo dinâmico do

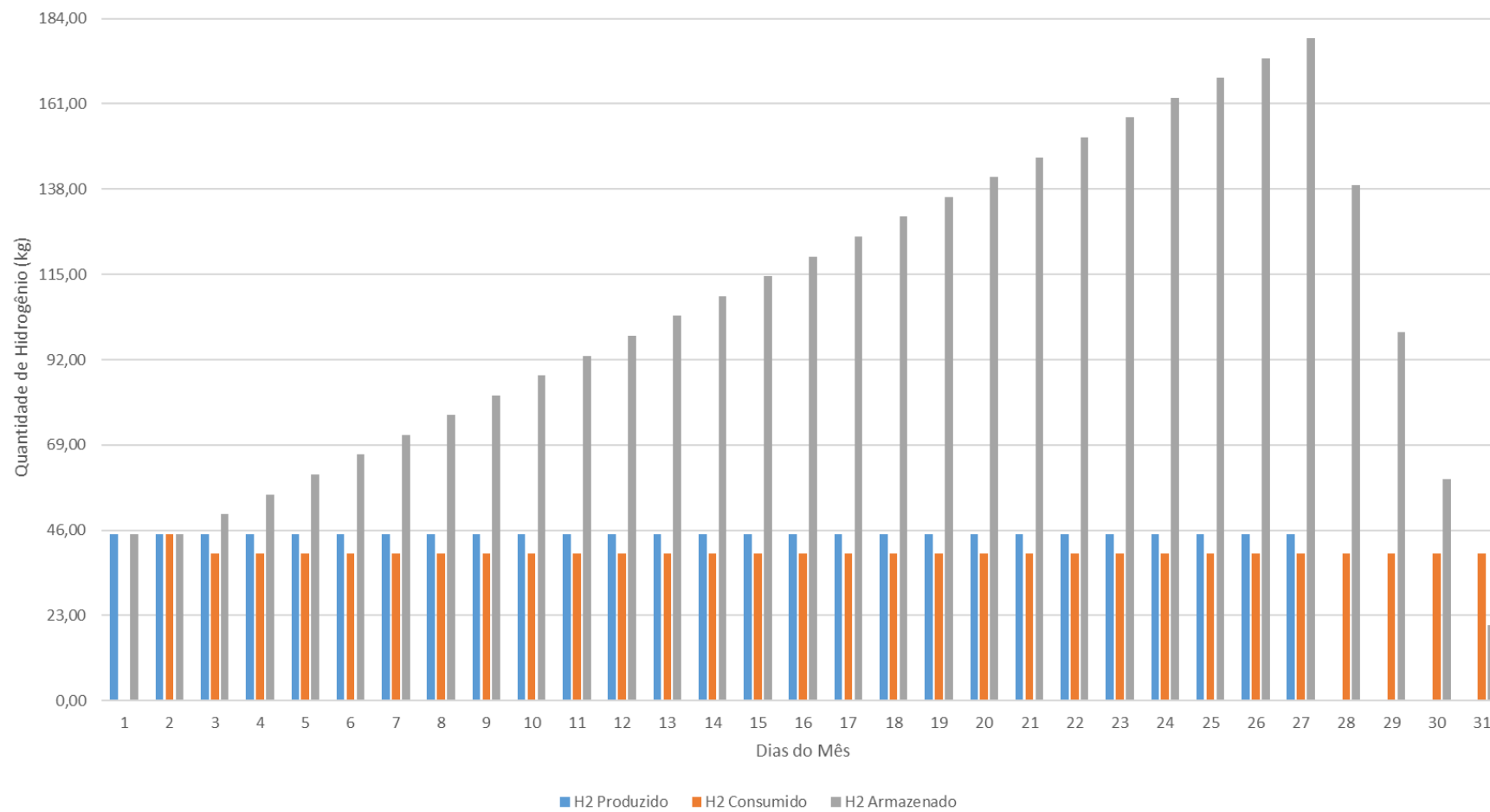
hidrogênio. Observou-se, ainda, de forma global, que o estoque mínimo atingido foi de 17,80 kg de hidrogênio no 333º dia (29 de novembro).

Figura 28 - Hidrogênio produzido, consumido e armazenado ao longo de 365 dias



Fonte: Elaboração própria

Figura 29 - Hidrogênio produzido, consumido e armazenado ao longo dos primeiros 31 dias, correspondentes ao mês de janeiro  
Janeiro



Fonte: Elaboração própria

## 5 ASPECTOS ECONÔMICOS

### 5.1 FATOR DE ANUIDADE

O fator de anuidade é o valor de um fluxo de rendimentos que produz um lucro em um período determinado, considerando uma taxa de juros anual e um período de amortização, conhecido como *payback*. O fator de anuidade está definido pelas equações (8) e (9) (SILVEIRA et al., 2012).

$$f = \frac{q^k \times (q - 1)}{q^k - 1} \quad (8)$$

$$q = 1 + \frac{r}{100} \quad (9)$$

Sendo,  $f$  o fator de anuidade [1/ano],  $k$  o período de amortização de capital [anos] e  $r$  a taxa anual de juros [%]; as taxas anuais de juros ( $r$ ) utilizadas nesta análise são de 4 %, 8 % e 12 %.

### 5.2 CUSTO DA ELETRICIDADE GERADA POR PLANTA

De acordo com Laranci, Silveira e Lamas (2012), o custo da energia elétrica gerada por uma planta de forma genérica pode ser definido pela equação (10).

$$C_{ge} = \frac{Inv \cdot f}{H \cdot P_{sistema}} + C_{man_{ge}} + C_{ope_{ge}} \quad (10)$$

Sendo,  $Inv$  o investimento da planta [US\$],  $f$  o fator de anuidade [1/ano],  $H$  o período de operação da planta [h/ano],  $P_{sistema}$  a potência do sistema [kW],  $C_{man_{ge}}$  o custo de manutenção [US\$/kWh] e  $C_{ope_{ge}}$  o custo de operação do sistema [US\$/kWh].

### 5.2.1 Custo de Manutenção por Planta

O custo de manutenção pode ser estimado em sendo 3 % do custo de investimento da planta, onde está incluído o salário do operário de manutenção, como pode ser visto na equação (11) (BRAGA, 2014).

$$C_{man_{ge}} = \frac{0,03 \cdot Inv}{H \cdot P_{sistema}} \quad (11)$$

### 5.2.2 Custo de Operação por Planta

O custo de operação está definido pela equação (12), onde considerou-se a energia consumida pelos componentes auxiliares do sistema.

$$C_{ope_{ge}} = \frac{P_{sec(cons)} \cdot C_{Elet}}{P_{sistema}} \quad (12)$$

Sendo,  $P_{sec(cons)}$  a potência elétrica consumida pelos demais componentes do sistema [kW] e  $C_{Elet}$  o custo da eletricidade da concessionária [US\$/kWh].

A tarifa da energia elétrica usada é 0.27 US\$/kWh (ENEL DISTRIBUIÇÃO SÃO PAULO, 2019).

## 5.3 CUSTO DA ELETRICIDADE GERADA PELA PLANTA HÍBRIDA

Sabendo-se o custo da eletricidade gerada por cada tecnologia utilizada (SSF, SE e SMCI), é aplicada uma média ponderada para calcular o custo da energia elétrica gerada pela planta híbrida a partir da equação (13), adaptada de (RUIZ, 2016).

$$C_{ge_{SH}} = \frac{\dot{E}_{GSF} \cdot C_{ge_{GSF}} + \dot{E}_{GE} \cdot C_{ge_{GE}} + \dot{E}_{GMCI} \cdot C_{ge_{GMCI}}}{\dot{E}_{GSF} + \dot{E}_{GE} + \dot{E}_{GMCI}} \quad (13)$$

Sendo,  $\dot{E}_{GSF}$  a energia elétrica gerada pelo sistema gerador solar fotovoltaico [kWh],  $C_{ge_{GSF}}$  o custo da eletricidade gerada pelo sistema gerador solar fotovoltaico [kWh/US\$],  $\dot{E}_{GE}$  a energia elétrica gerada pelo sistema gerador eólico [kWh],  $C_{ge_{GE}}$  o custo da eletricidade gerada pelo sistema gerador eólico [kWh/US\$],  $\dot{E}_{GMCI}$  a energia elétrica gerada pelo sistema gerador de motor de combustão interna [kWh] e  $C_{ge_{GMCI}}$  o custo da eletricidade gerada pelo sistema gerador de motor de combustão interna [kWh/US\$].

#### 5.4 RECEITA ANUAL ESPERADA PELA ELETRICIDADE GERADA

Para conhecer o período de retorno do investimento (*payback*), é utilizada a equação (14), a qual define o rendimento anual esperado (LARANCI; SILVEIRA; LAMAS, 2012).

$$G_{el} = P_{SH} \cdot H \left( C_{Elet} - C_{ge_{SH}} \right) \quad (14)$$

Sendo,  $P_{SH}$  a potência do sistema híbrido [kW],  $H$  o período de operação da planta [h/ano],  $C_{Elet}$  o custo da eletricidade da concessionária [US\$/kWh] e  $C_{ge_{SH}}$  o custo de eletricidade gerada pela planta [US\$/kWh].

A tarifa da energia elétrica usada é 0.27 US\$/kWh (ENEL DISTRIBUIÇÃO SÃO PAULO, 2019).

#### 5.5 CUSTO DO HIDROGÊNIO GERADO POR PLANTA

Segundo Braga (2014), o custo do hidrogênio produzido por uma planta é definido pela equação (15).

$$C_{H_2} = \frac{Inv \cdot f}{H \cdot \dot{E}_{H_2}} + C_{man_{H_2}} + C_{ope_{H_2}} \quad (15)$$

Sendo,  $Inv$  o investimento da planta [US\$],  $f$  o fator de anuidade [1/ano],  $H$  o período de operação da planta [h/ano],  $\dot{E}_{H_2}$  a energia contida no hidrogênio produzido [kWh],

$C_{man_{H_2}}$  o custo de manutenção [US\$/kWh] e  $C_{ope_{H_2}}$  o custo de operação do sistema [US\$/kWh].

Segundo Braga (2014), a energia disponível no hidrogênio ( $\dot{E}_{H_2}$ ) produzido é calculada pela equação (16).

$$\dot{E}_{H_2} = \dot{m}_{H_2} \cdot PCI_{H_2} \quad (16)$$

Sendo,  $\dot{m}_{H_2}$  o fluxo mássico de hidrogênio produzido [kg/s] e  $PCI_{H_2}$  o poder calorífico inferior do hidrogênio [kJ/kg].

### 5.5.1 Custo de Manutenção por Planta

O custo de manutenção pode ser estimado como sendo 3 % do custo de investimento da planta, como pode ser visto na equação (17) (BRAGA, 2014).

$$C_{man_{H_2}} = \frac{0,03 \cdot Inv}{H \cdot \dot{E}_{H_2}} \quad (17)$$

### 5.5.2 Custo de Operação por Planta

De acordo com Braga (2014), o custo de operação ( $C_{ope}$ ) depende do combustível, equação (18) e/ou da fonte de energia, equação (19) utilizada no processo.

$$C_{ope_{H_2}} = \frac{E_{comb_{MCI}} \cdot C_{comb_{MCI}}}{\dot{E}_{H_2}} + \frac{\dot{m}_{H_2O} \cdot C_{H_2O}}{\dot{E}_{H_2}} \quad (18)$$

$$C_{ope_{H_2}} = \frac{E_{Elet_{(cons)}} \cdot C_{Elet}}{\dot{E}_{H_2}} + \frac{\dot{m}_{H_2O} \cdot C_{H_2O}}{\dot{E}_{H_2}} \quad (19)$$

Sendo,  $E_{comb_{MCI}}$  a potência suprida pelo biogás [kW],  $C_{comb_{MCI}}$  o custo do biogás [US\$/kWh],  $\dot{m}_{H_2O}$  o fluxo de água requerido [m<sup>3</sup>]  $C_{H_2O}$  o custo da água [US\$/m<sup>3</sup>] e  $E_{Elet,(cons)}$  potência elétrica consumida pelo eletrolisador [kW].

A tarifa da energia elétrica usada é 0.27 US\$/kWh (ENEL DISTRIBUIÇÃO SÃO PAULO, 2019).

O custo do biogás foi adaptado de Paulino (2017) avaliado em 0.0125 US\$/kWh.

A tarifa de água praticada na cidade de São Paulo para um consumo entre 21 e 50 m<sup>3</sup>/mês é 4.83 US\$/m<sup>3</sup> (COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2019).

## 5.6 RECEITA ANUAL ESPERADA PELA HIDROGÊNIO GERADO

Para conhecer o período de retorno do investimento (*payback*), é utilizada a equação (20) modificada, a qual define o rendimento anual esperado (LARANCI; SILVEIRA; LAMAS, 2012).

$$G_{H_2} = P_{Elet} \cdot H \left( C_{H_2c} - C_{H_2} \right) \quad (20)$$

Sendo,  $P_{Elet}$  a potência do eletrolisador em relação à produção de hidrogênio [kW],  $H$  o período de operação da planta [h/ano],  $C_{H_2c}$  o custo do hidrogênio comercial [US\$/kWh] e  $C_{H_2}$  o custo do hidrogênio gerado pela planta [US\$/kWh].

O custo do hidrogênio comercial é de aproximadamente 0.42 US\$/kWh (CALIFORNIA ENERGY COMMISSION, 2015).

## 5.7 CUSTO DO ARMAZENAMENTO DO HIDROGÊNIO EM ESTADO GASOSO

De acordo com Moreno-Blanco et al. (2019), os custos para tanques para armazenamento de hidrogênio gasoso comprimido para ônibus foram recentemente estimados em apenas 10 US\$/kWh quando feito para pressão de 350 bar (35 MPa). Sabe-se ainda que 1 kg de hidrogênio contém 33,33 kWh de energia utilizável.

## 5.8 RESULTADOS DA ANÁLISE ECONÔMICA

Na Tabela 11 pode-se observar os investimentos feitos em cada sistema gerador e na planta híbrida como um todo.

Tabela 11 - Investimento realizado para o funcionamento da planta híbrida

<b>Descrição</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Valor Unitário (US\$)</b>	<b>Valor Total (US\$)</b>
Módulos fotovoltaicos <i>Canadian Solar CS6X-315</i>	387	217,43	84.145,41
Turbinas eólicas <i>Aeolos 5 kW</i>	136	9.990,00	1.358.640,00
Motor de combustão interna-gerador <i>ER-BR OC13 6C/24V</i>	1	480.000,00	480.000,00
Eletrolisador <i>Hydrogenics HySTAT®-100-10</i>	1	867.624,00	867.624,00
Compressor de hidrogênio <i>HYDRO-PAC C06-40-300/600LX</i>	1	135.000,00	135.000,00
Medidores de Eletricidade Bidirecional	7	24.159,65	169.117,55
		Subtotal	3.094.526,96
		Custo de instalação (30 %)	928.358,09
		Total	4.022.885,05

Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 12 pode-se observar o investimento feito nos tanques para armazenamento de hidrogênio comprimido, partindo da premissa de que o estoque total é 180 kg de hidrogênio e que a cada 1 kg de hidrogênio contém 33,33 kWh de energia utilizável.

Tabela 12 - Investimento realizado nos tanques para armazenamento de hidrogênio

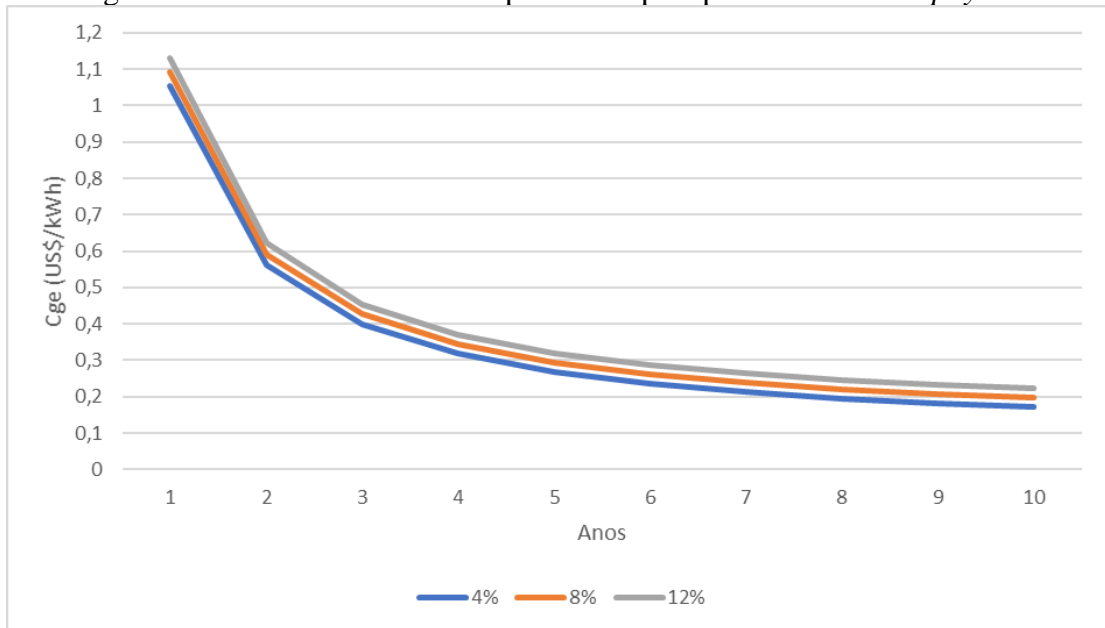
<b>Descrição</b>	<b>Quantidade (kWh)</b>	<b>Valor Unitário (US\$/kWh)</b>	<b>Valor Total (US\$)</b>
Tanque para armazenamento de H <sub>2</sub> comprimido	5.999,40	10,00	59.994,00
		Subtotal	59.994,00
		Custo de instalação (30 %)	17.998,20
		Total	77.992,20

Fonte: Elaboração própria

Visto os investimentos ilustrados nas Tabelas 11 e 12, o total investido na planta híbrida é de US\$ 4.100.877,25.

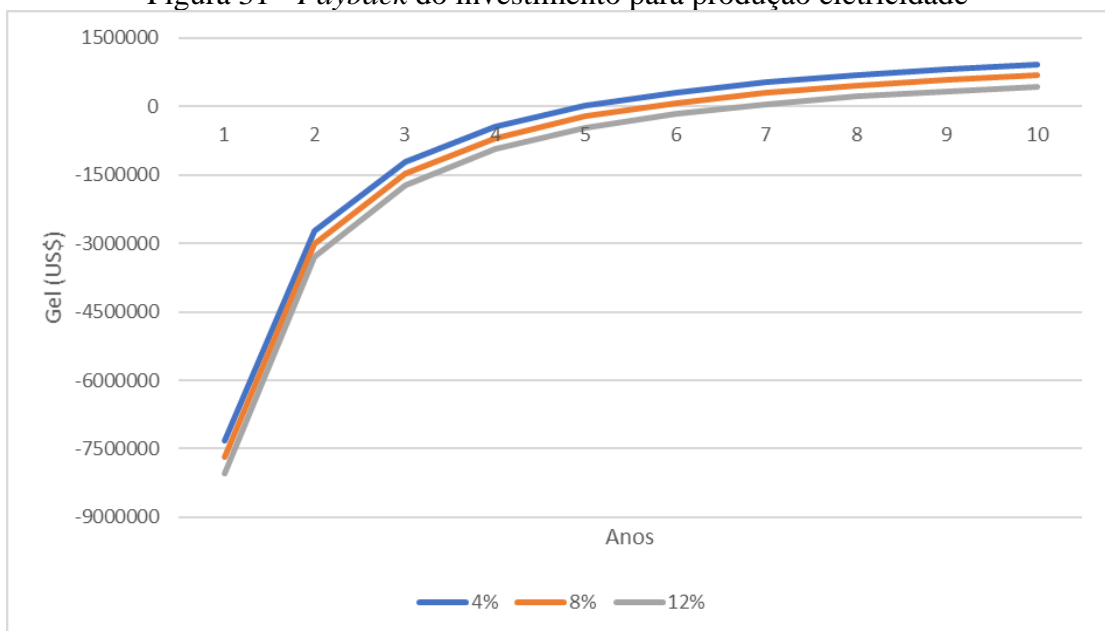
As Figuras 30 e 31 apresentam os resultados referentes à geração de eletricidade. Observa-se na Figura 31 que em um cenário com taxa de juros de 4 % a.a., o investimento feito levaria aproximadamente cinco anos para ser pago, entretanto, num cenário com taxa de juros de 12 % a.a., aproximadamente sete anos.

Figura 30 - Custo da eletricidade produzida pela planta híbrida vs. *payback*



Fonte: Elaboração própria

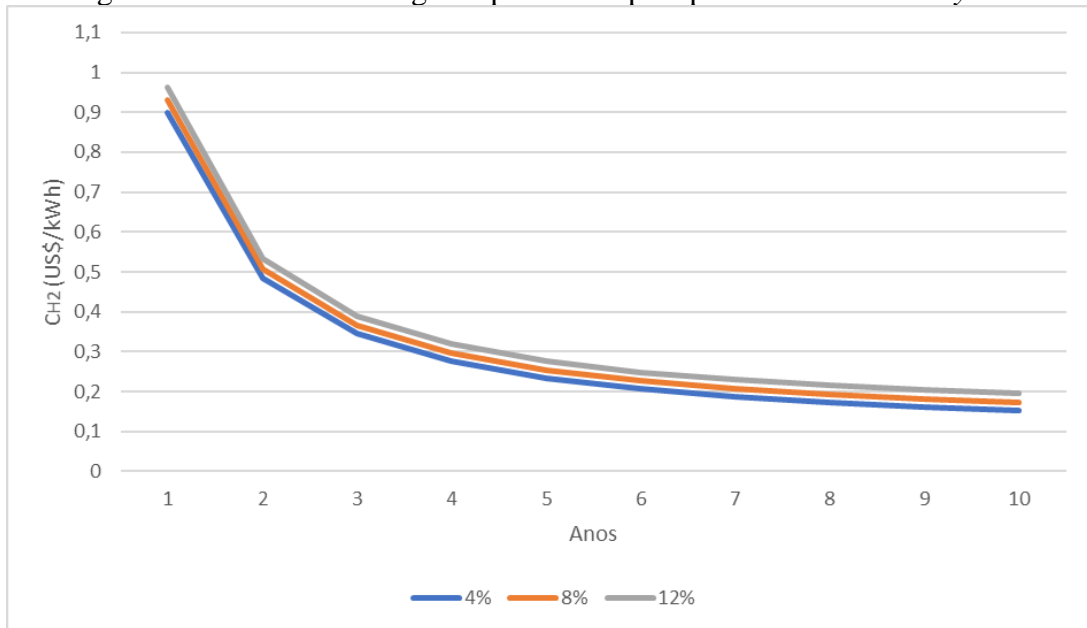
Figura 31 - *Payback* do investimento para produção eletricidade



Fonte: Elaboração própria

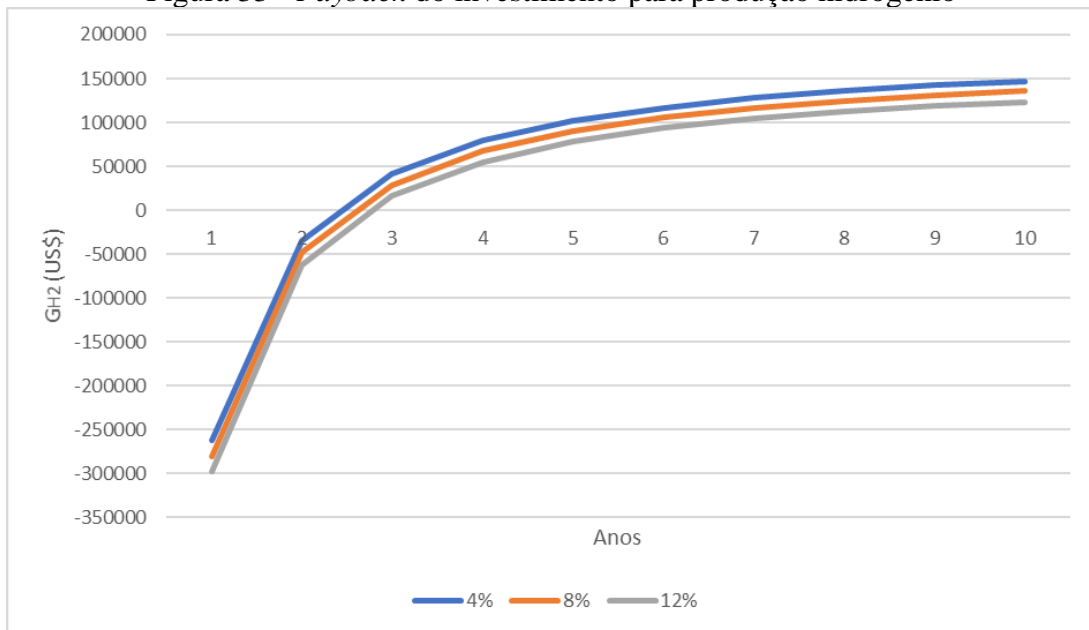
As Figuras 32 e 33 apresentam os resultados referentes à geração de hidrogênio. Observa-se na Figura 33 que em um cenário com taxa de juros a 4 % a.a., o investimento feito levaria pouco mais de dois anos para ser pago, entretanto, num cenário com taxa de juros de 12 % a.a., aproximadamente sete anos.

Figura 32 - Custo do hidrogênio produzido pela planta híbrida vs. *Payback*



Fonte: Elaboração própria

Figura 33 - *Payback* do investimento para produção hidrogênio



Fonte: Elaboração própria

## 6 ASPECTOS AMBIENTAIS

A análise proposta por Viola, Paulino e Silveira (2018) tem como referencial o potencial de aquecimento global (PAG) médio da combustão do carvão lignito, como tecnologia mais poluente e menos eficiente, e da pequena central hidroelétrica (PCH), como tecnologia menos poluente e mais eficiente, como pode ser visto na Tabela 13.

Tabela 13 - PAG médio para a produção de hidrogênio eletrolítico por diversas fontes

<b>Fonte de Geração de Energia Elétrica</b>	<b>PAG médio (kgCO<sub>2</sub>/kgH<sub>2</sub>)</b>
Hidroelétrica	0,416
Nuclear	0,646
Eólica	0,725
Biomassa (co-combustão)	2,339
Biomassa (gás)	2,960
Biomassa (combustão)	2,556
Solar	3,170
Gás Natural (ciclo combinado)	28,314
Carvão (gaseificação)	48,115
Óleo	47,471
Gás Natural (ciclo simples)	48,956
Carvão (combustão)	59,566
Lignito	63,539

Fonte: Adaptado de Viola, Paulino e Silveira (2018).

Segundo Viola, Paulino e Silveira (2018), a metodologia proposta por Cârdu e Baica (1999) para o cálculo de um indicador denominado “eficiência ecológica-energética” para plantas termoelétricas pode ser adaptado a fim de enquadrar-se na análise da produção de hidrogênio por eletrólise com energia proveniente de fontes renováveis. Podendo ser expressa pela equação (21), a qual foi modificada para determinar a eficiência ecológica da produção de hidrogênio por processos eletrolíticos.

$$\varepsilon = \left[ 0,234 \cdot \frac{\eta}{(\eta + PAG)} \cdot \ln(71 - PAG) \right]^{0,064} \quad (21)$$

Sendo,  $\varepsilon$  a eficiência ecológica [-] e  $PAG$  o potencial de aquecimento global [kgCO<sub>2</sub>/kgH<sub>2</sub>].

A eficiência do processo de produção de hidrogênio ( $\eta$ ) pode ser determinada pela equação (22) (VIOLA; PAULINO; SILVEIRA, 2018).

$$\eta = \eta_{fonte} \cdot \eta_{eletrolisador} \quad (22)$$

Sendo,  $\eta_{fonte}$  a eficiência de geração de energia elétrica [-] e  $\eta_{eletrolisador}$  a eficiência do eletrolisador [-].

Conhecendo a eficiência ecológica de cada tecnologia utilizada no sistema híbrido, pode-se calcular a eficiência ecológica a planta híbrida estudada pela adaptação da equação de Ruiz (2016), tornando-se a equação (23).

$$\varepsilon_{SH} = \frac{\dot{E}_{GSF} \cdot \varepsilon_{GSF} + \dot{E}_{GE} \cdot \varepsilon_{GE} + \dot{E}_{GMCI} \cdot \varepsilon_{GMCI}}{\dot{E}_{GSF} + \dot{E}_{GE} + \dot{E}_{GMCI}} \quad (23)$$

Sendo,  $\varepsilon_{SH}$  a eficiência ecológica do sistema híbrido [-],  $\varepsilon_{GSF}$  a eficiência ecológica do sistema gerador solar fotovoltaico [-],  $\varepsilon_{GE}$  a eficiência ecológica do sistema gerador eólico [-] e  $\varepsilon_{GMCI}$  a eficiência ecológica do sistema gerador de motor de combustão interna [-].

## 6.1 RESULTADOS DA EFICIÊNCIA ECOLÓGICA

Observa-se na Tabela 14 os resultados referentes à eficiência ecológica de cada um dos sistemas geradores e da planta híbrida. Interpreta-se os resultados obtidos como sendo de alto nível de eficiência ecológica aqueles iguais a 1 e de baixo nível de eficiência ecológica os iguais a 0. Os sistemas geradores isoladamente obtiveram resultados que ultrapassaram 0,80 e o sistema híbrido obteve uma eficiência ecológica de 0,853084, mostrando um desempenho de alta eficiência ecológica.

Tabela 14 - Eficiência ecológica por sistema gerador

<b>Sistema Gerador</b>	<b>Eficiência Ecológica</b>
$\epsilon_{GSF}$	0,798533
$\epsilon_{GE}$	0,916026
$\epsilon_{GMCI}$	0,843425
$\epsilon_{SH}$	0,853084

Fonte: Elaboração própria

## 7 CONCLUSÃO

O uso de fontes renováveis para geração de eletricidade permite o desenvolvimento de uma das rotas mais eficazes para produção de hidrogênio a partir do processo de eletrólise da água, corroborando para a ascensão de uma economia baseada nesse importante vetor energético.

Da análise energética conclui-se que o sistema híbrido (solar-eólico-biogás) pode gerar em média 78.110 kWh/mês de eletricidade, com uma potência instalada de 1.101,905 kW, e produzir 13.458,30 Nm<sup>3</sup>/mês de hidrogênio, pela utilização do processo de eletrólise da água. Esse processo apresenta eficiência de geração de hidrogênio de 15,21 %.

Da análise econômica observa-se que tanto o custo de produção de eletricidade quanto o custo de produção de hidrogênio, diminuem com o aumento do período de amortização de capital investido (*payback*) e aumentam, conforme se incrementam as taxas anuais de juros.

O custo de produção de eletricidade no sistema híbrido, para um período de amortização de 10 anos, e uma taxa anual de juros de 4 %, se situa entre 0,171 – 1,053 US\$/kWh, para uma taxa anual de juros de 8 %, esse intervalo se situa entre 0,196 – 1,092 US\$/kWh e para uma taxa anual de 12 %, entre 0,223 – 1,130 US\$/kWh. O período de amortização do capital investido no sistema híbrido considerando somente a produção de eletricidade se situa entre 5 – 7 anos, a depender a taxa anual de juros praticada.

Ao considerar a produção de hidrogênio, a faixa de custo de sua produção, para um período de amortização de 10 anos, e uma taxa anual de juros de 4 %, se situa entre 0,110 – 0,898 US\$/kWh, para uma taxa anual de 8 %, esse intervalo se situa entre 0,133 – 0,930 US\$/kWh e para uma taxa anual de 12 %, entre 0,159 – 0,963 US\$/kWh. O período de amortização do capital investido no sistema híbrido considerando a produção de hidrogênio varia entre 2 e 3 anos, a depender também da taxa de juros anual praticada.

Da análise ecológica conclui-se que as fontes renováveis do sistema híbrido (solar-eólico-biogás) para geração de hidrogênio eletrolítico permitem o desenvolvimento sustentável para a adequada inserção desse vetor energético no setor de transporte. A eficiência ecológica considerando o sistema híbrido é de 85,31 %. Ao avaliar isoladamente cada um dos sistemas geradores, conclui-se ainda que o sistema eólico é o que apresenta maior eficiência ecológica, 91,60 %, o sistema de motor de combustão interna a biogás apresentou eficiência ecológica de 84,34 % e, por fim, o sistema solar fotovoltaico apresentou menor eficiência ecológica, 79,85 %.

Pelos resultados obtidos, pode-se concluir que o sistema híbrido proposto é capaz de fornecer a eletricidade demandada para o processo de eletrólise da água, para a produção de hidrogênio e sua compressão.

Finalmente, conclui-se que a aplicação de energias renováveis para produção de hidrogênio e eletricidade são viáveis sobre o ponto de vista técnico, econômico e ambiental, corroborando para uma participação cada vez menor de combustíveis de origem fóssil nos mais diversos setores da sociedade.

## 7.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

São sugestões para trabalhos futuros:

- Estudos exergéticos dos processos apresentados;
- Estudos de sistemas similares para atendimento de frotas de ônibus maiores;
- Análise exergoeconômica-ambiental dos sistemas considerados;
- Estudos de outros cenários de sistemas geradores de hidrogênio utilizando energias renováveis.

## REFERÊNCIAS

- AEOLOS. **Aeolos-v 5 kW**. Londres, 2012. Disponível em: <<https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1853-aeolos-aeolos-v-5kw>>. Acesso em: 18 fev. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2. ed. Brasília: Fundação Biblioteca Nacional, 2005. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/atlas2005.zip>>. Acesso em: 20 ago. 2018.
- ARZAMENDI, G.; DIE, P. M.; GANDI, L. M. **Renewable hydrogen technologies: production, purification, storage, applications and safety**. [s.l.] Elsevier Science, 2013. 472 p.
- BARROS, R. M.; FILHO, G. L. T.; DA SILVA, T. R. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. **Energy Policy**, United Kingdom, v. 65, p. 150–164, 2014.
- BARTHELEMY, H.; WEBER, M.; BARBIER, F. Hydrogen storage: recent improvements and industrial perspectives. **International Journal of Hydrogen Energy**, United Kingdom, v. 42, n. 11, p. 7254–7262, 2017.
- BASILE, A.; IULIANELLI, A. **Advances in hydrogen production, storage and distribution**. [s.l.] Elsevier, 2014.
- BEIG, A. R.; MUYEEN, S. M. Wind energy. *In: Electric renewable energy systems*. Abu Dhabi: Elsevier Inc., 2016. chap. 4. p. 60–77.
- BIDRAM, A.; DAVOUDI, A.; BALOG, R. S. Control and circuit techniques to mitigate partial shading effects in photovoltaic arrays. **IEEE Journal of Photovoltaics**, United States, v. 2, n. 4, p. 532–546, 2012.
- BP. **BP statistical review of world energy 2018**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2018.
- BRAGA, Lucia Bollini. **Análise econômica do uso de célula a combustível para acionamento de ônibus urbano**. 2010. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2010.
- BRAGA, Lucia Bollini. **Aspectos técnicos, econômicos e ecológicos de processos de produção de hidrogênio**. 2014. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2014.
- CALIFORNIA ENERGY COMMISSION. **Joint agency staff report on assembly bill 8: assessment of time and cost needed to attain 100 hydrogen refueling stations in California**. Disponível em: <<https://ww2.energy.ca.gov/2015publications/CEC-600-2015-016/CEC-600-2015-016.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2020.
- CANADIAN SOLAR. **Maxpower - cs6x-310|315|320|325** p. Ontario, 2016. Disponível em: <<https://sicc solar.com.br/PDF/CanadianSolar/1ModulosFotovoltaicos/3.1.Modulo72cells>>

/3.1.1StandardPoly-SiCS6X/canadian\_solar-datasheet-maxpower-CS6X-P-v5.pdf >. Acesso em: 18 fev. 2019.

CÂRDU, M.; BAICA, M. Regarding a new variant methodology to estimate globally the ecologic impact of thermopower plants. **Energy Conversion and Management**, United Kingdom, v. 40, n. 14, p. 1569–1575, 1999.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Tecnologias críticas e sensíveis em setores prioritários - hidrogênio energético no Brasil - subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025**. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010. Disponível em:<[https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Hidrogenio\\_energetico\\_completo\\_22102010\\_9561.pdf/367532ec-43ca-4b4f-8162-acf8e5ad25dc?version=1.3](https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Hidrogenio_energetico_completo_22102010_9561.pdf/367532ec-43ca-4b4f-8162-acf8e5ad25dc?version=1.3)>. Acesso em: 05 mar. 2019.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA. **Potencial solar - sundata v 3.0 - cidade de São Paulo**, 2019a. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em: 9 fev. 2019

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA. **Potencial eólico - cidade de São Paulo**, 2019b. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em: 9 fev. 2019

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Padrões de qualidade do ar**, 2018. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/padroes-de-qualidade-do-ar/>>. Acesso em: 15 dez. 2018

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Comunicado 5/2019 - tabelas tarifárias com vigência a partir de 11/05/2019**. Disponível em:< [http://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/asabesp\\_doctos/Comunicado%205-19.pdf](http://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/asabesp_doctos/Comunicado%205-19.pdf)>. Acesso em: 08 jul. 2019.

DA SILVA, S. S.; CHANDEL, A. K. **Biofuels in Brazil: fundamental aspects, recent developments, and future perspectives**. [s.l.] Springer, 2014. 435 p.

DE ARAÚJO, Fernando Henrique Mayworm. **Análise técnica e econômica do armazenamento de hidrogênio por processo de compressão**. 2016. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2016.

DIAS, G. F. **Educação ambiental: princípios e práticas**. 9.ed. São Paulo: Gaia, 2010.

DOS REIS, L. B.; SANTOS, E. C. **Energia elétrica e sustentabilidade: aspectos tecnológicos, socioambientais e legais**. 2.ed. [s.l.] Manole, 2014.

DOS SANTOS, M. V. **Principais problemas dos motores a biogás e tecnologias de biometanização: estudo de caso**. 2016. 111f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica) Universidade de Taubaté, Taubaté, 2016.

ELDIN, A. H.; REFAEY, M.; ABDELRAHMAN, F. **A review on photovoltaic solar energy technology and its efficiency**. 17th International Middle-East Power System Conference.

Anais[...]Mansoura: 2015

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço energético nacional 2018: ano base 2017**. Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018\\_\\_Int.pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf)>. Acesso em: 09 set. 2018.

EMPRESA METROPOLITANA DE TRANSPORTES URBANOS DE SÃO PAULO. **Corredor metropolitano ABD (São Mateus - Jabaquara)**, 2017a. Disponível em: <<http://www.emtu.sp.gov.br/emtu/redes-de-transporte/corredores-terminais/corredor-metropolitano-abd.fss>>. Acesso em: 1 fev. 2019

EMPRESA METROPOLITANA DE TRANSPORTES URBANOS DE SÃO PAULO. **Mapa do traçado do corredor metropolitano ABD (São Mateus - Jabaquara)**, 2017b. Disponível em: <<http://www.emtu.sp.gov.br/emtu/redes-de-transporte/corredores-terminais/corredor-metropolitano-abd/mapa-do-tracado.fss>>. Acesso em: 9 fev. 2019

ENEL DISTRIBUIÇÃO SÃO PAULO. **Tarifação de energia elétrica**, 2019. Disponível em: <<https://www.eneldistribuicaosp.com.br/para-seu-negocio/tarifa-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 4 jul. 2019

MINISTÉRI DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano nacional de energia 2030**. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-PNE-2030>>. Acesso em: 01 jul. 2018.

ER-BR - ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Grupos geradores a gás biogás - gás natural - syngas - GLP ER-BR - Energias Renováveis Ltda.**, 2018. Disponível em: <<https://www.erbr.com.br/midia/1/catalogos>>. Acesso em: 18 fev. 2019.

ESTÊVÃO, Tânia Esmeralda Rodrigues. **O hidrogênio como combustível**. 2008. 89 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

FERREIRA, Paulo Fabrício Palhavam. **Infra-estrutura para uso energético do hidrogênio: estações de abastecimento para veículos com células a combustível**. 2007. 134 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, 2007.

GUO, M.; SONG, W.; BUHAIN, J. Bioenergy and biofuels: history, status, and perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Netherlands, v. 42, p. 712–725, 2015.

HAQUE, A. Solar energy. *In: Electric renewable energy systems*. New Delhi: Elsevier Inc., 2016. chap. 3. p. 40–59.

HYDRO-PAC. **Lx-series<sup>tm</sup> hydrogen gas compressors 1500 to 12000 psi**. Fairview, 2011. Disponível em: <<http://www.hydropac.com/literature/LX-SERIES>>. Acesso em: 18 fev. 2019.

HYDROGENICS. **Renewable hydrogen solutions**, 2018. Disponível em: <<http://www.hydrogenics.com/wp-content/uploads/Renewable-Hydrogen-Brochure.pdf>>.

Acesso em: 19 fev. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Annual energy review 2011**. Washington: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/pdf/aer.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World energy outlook 2013**. Paris: [s.n.]. Disponível em: <[https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383\(2013\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383(2013).pdf)>. Acesso em: 10 jun. 2018.

JACOBSON, M. Z. *et al.* 100% Clean and renewable wind, water, and sunlight all-sector energy roadmaps for 139 countries of the world. **Joule**, United States, v. 1, n. 1, p. 108–121, 2017.

KAR, S. K.; SINHA, P. K. Ensuring sustainable energy security: challenges and opportunities for India. **Oil, Gas & Energy Law**, [s.l.], v. 4, 2014.

LARANCI, P.; SILVEIRA, J. L.; LAMAS, W. D. Q. Solar 1.1 software: a case study of a chicken farm illumination project. **Exacta**, [s.l.], v. 10, n. 1, 2012.

LUND, H.; SALGI, G. The role of compressed air energy storage (CAES) in future sustainable energy systems. **Energy Conversion and Management**, United Kingdom, v. 50, p. 1172–1179, 2009.

MARKVART, T.; CASTANER, L.; MCEVOY, A. **Solar cells - materials, manufacture and operation**. 2.ed. [s.l.] Elsevier Ltd, 2013.

MATA-ALVAREZ, J.; MACÉ, S.; LLABRÉS, P. Anaerobic digestion of organic solid wastes: an overview of research achievements and perspectives. **Bioresource Technology**, Netherlands, v. 74, p. 3–16, 2000.

MORENO-BLANCO, J. *et al.* The storage performance of automotive cryo-compressed hydrogen vessels. **International Journal of Hydrogen Energy**, United Kingdom, v. 44, n. 31, p. 16841–16851, 2019.

NASH, D. *et al.* Hydrogen storage: compressed gas. *In: Comprehensive renewable energy*. [s.l.] Elsevier Ltd., 2012. v. 4, p. 131–155.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **Renewable electrolysis**, 2014. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/hydrogen/renewable-electrolysis.html>>. Acesso em: 14 maio. 2018

NEHRIR, M. H.; WANG, C. Fuel cells. *In: Electric renewable energy systems*. Bozeman: Elsevier Inc., 2016. chap. 6. p. 92–113.

NEVES, N. P.; PINTO, C. S. Licensing a fuel cell bus and a hydrogen fueling station in Brazil. **International Journal of Hydrogen Energy**, United Kingdom, v. 38, n. 19, p. 8215–8220, 2013.

NOVAKOVIC, B.; NASIRI, A. Introduction to electrical energy systems. *In: Electric*

**renewable energy systems.** [s.l.], Elsevier Inc., 2016. chap. 1. p. 1–20.

OH, T. H.; CHUA, S. C.; GOH, W. W. Bakun - where should all the power go? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Netherlands, v. 15, n. 2, p. 1035–1041, 2011.

OLIVIER, J. G. J. *et al.* Trends in global co2 emissions: 2016 report. **PBL Netherlands Environmental Assessment Agency & European Commission’s Joint Research Centre (JRC)**, p. 86, 2016.

ONG, H. C.; MAHLIA, T. M. I.; MASJUKI, H. H. A review on energy scenario and sustainable energy in Malaysia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Netherlands, v. 15, n. 1, p. 639–647, 2011.

PALADINO, Patrícia Aandrea. **Uso do hidrogênio no transporte público de são paulo.** 2013. 195 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

PAULINO, Regina Franciélle Silva. **Uso do biogás para produção de biohidrogênio: eletrólise versus reforma a vapor.** 2017. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2017.

RAHMAN, M. M. *et al.* extension of energy crops on surplus agricultural lands: a potentially viable option in developing countries while fossil fuel reserves are diminishing. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Netherlands, v. 29, p. 108–119, 2014.

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY. **Renewables 2017: global status report.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399\\_GSR\\_2017\\_Full\\_Report\\_0621\\_Opt.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf)> <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.049> <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>>. Acesso em: 03 out. 2018.

ROBERTS, Justo José. **Análise de desempenho de um sistema híbrido de geração de energia solar-eólico-diesel considerando variações probabilísticas da carga e dos recursos renováveis.** 2012. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2012.

RUIZ, Jorge Mario Avella. **Aspectos técnicos, econômicos e ambientais da implementação de energia eólica e solar fotovoltaica em edifícios.** 2016. f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2016.

SHARMA, N. K.; TIWARI, P. K.; SOOD, Y. R. Solar energy in india: strategies, policies, perspectives and future potential. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Netherlands, v. 16, n. 1, p. 933–941, 2012.

SILVEIRA, J. L. *et al.* Uso de etanol para a produção de hidrogênio e acionamento de motor aeronáutico flex. In: **Bioenergia: desenvolvimento, pesquisa e inovação.** São Paulo: Cultura Acadêmica, 2012. cap. 17. p. 547–593.

SINGH, S. *et al.* Hydrogen: a sustainable fuel for future of the transport sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Netherlands, v. 51, p. 623–633, 2015.

SORENSEN, B. **Renewable energy conversion, transmission and storage**. [*s.l.*] Elsevier, 2007.

VIOLA, L.; SILVA PAULINO, R. F.; LUZ SILVEIRA, J. Ecological aspects of electrolytic hydrogen: comparing renewable and non-renewable sources. *In*: BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING, 17., 2018, Águas de Lindóia. **Abstracts** [...]. Águas de Lindóia, 2018.

WEILAND, P. Biogas production: current state and perspectives. **Applied Microbiology and Biotechnology**, Germany, v. 85, n. 4, p. 849–860, 2010.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our common future**. Oslo: [*s.n.*]. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07488008808408783>>. Acesso em: 01 dez. 2018.

YOUNGER, M. *et al.* The built environment, climate change, and health - opportunities for co-benefits. **American Journal of Preventive Medicine**, Netherlands, v. 35, n. 5, p. 517–526, 2008.

ZHU, S. *et al.* Daily air quality index forecasting with hybrid models: a case in China. **Environmental Pollution**, United Kingdom, v. 231, p. 1232–1244, 2017.